



# Mise en relation des contraintes hydrauliques et de la granulométrie de la trappe à sédiments. Site expérimental de l'ORE Draix-Bléone, torrent du Moulin

Thomas Gagneux

## ► To cite this version:

Thomas Gagneux. Mise en relation des contraintes hydrauliques et de la granulométrie de la trappe à sédiments. Site expérimental de l'ORE Draix-Bléone, torrent du Moulin. Hydrologie. 2014. dumas-01110623

**HAL Id: dumas-01110623**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01110623>**

Submitted on 28 Jan 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Master 2 Recherche « Sciences du territoire »**

**Mention « Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision, Environnement »  
(STADE)**

**Mise en relation des contraintes hydrauliques et de la granulométrie de la trappe à sédiments. Site expérimental de l'ORE Draix-Bléone, torrent du Moulin.**

Mémoire soutenu le 08 Septembre 2014 par

**Thomas GAGNEUX**

Devant un jury composé de :

Directeur de mémoire : M. Frédéric Liébault (Chargé de recherche, Irstea, Grenoble – ETNA)

Examineurs : M. Philippe Schoeneich (Enseignant chercheur, IGA, UJF - Pacte, Grenoble)

M. Bruno Wilhelm (Enseignant, IGA, UJF Grenoble. Postdoc, IGS, Université de Bern)

Organisme d'accueil : Irstea (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture)



## REMERCIEMENTS

Mes principaux remerciements vont, bien entendu, à Frédéric Liébault. Merci de m'avoir fait confiance dès mon stage de première année de Master. Ces 2 stages consécutifs ont grandement amélioré mes connaissances et ont conforté mon désir de continuer dans les domaines de l'hydraulique (de base) et de l'hydromorphologie. Ces stages enrichissants m'ont permis de connaître le site d'étude de Draix, paradis des études sur l'érosion (et, accessoirement, du VTT !). Merci encore !

En parlant de Draix, les nombreux (et plus ou moins difficiles) relevés de terrain n'auraient pas été aussi agréables sans la présence de Frédéric Liébault mais aussi d'Hugo Jantzi et Sébastien Klotz. Merci à vous pour votre aide et bonne continuation sur ce fabuleux terrain de jeu. Au plaisir de vous y recroiser, professionnellement ou pour une visite touristique. Bon courage pour ta thèse Hugo.

Merci à toute l'équipe enseignante du Master STADE pour les cours prodigués et en particulier Philippe Schoeneich pour ses enseignements concernant la géomorphologie. Son stage de terrain, à Ristolas, proposé aux étudiants de Licence 3 a été, pour moi, le déclencheur d'une passion pour la géomorphologie. Merci d'avoir accepté d'être le tuteur de ce stage de Master 2 Recherche.

Merci à mes collègues de l'Irstea, dont Guillaume Piton et Coraline Bel pour leur précieuse aide lors de mon stage de M1 et merci à mes collègues de bureau pour leur bonne humeur quotidienne. Mais surtout, merci à Clémentine Comte et Sarah Labhessoule... Labesshoule... Lhabessoule... nan Labessoulhe ! Même si votre déprime se ressentait à la fin de votre période de terrain, vous avez toujours gardé votre bonne humeur et vos fous rires (que je n'ai pas toujours compris d'ailleurs...). Et malgré votre humeur taquine et moqueuse certains jours... au final je vous aime bien !

Enfin, merci à ma compagne de tous les jours pour son aide sur le terrain et son soutien lors de la rédaction de ce manuscrit. Merci de ta présence au quotidien.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>7</b>
1. CONTEXTE GENERAL.....	7
2. ÉTAT DE LA RECHERCHE.....	7
3. OBJECTIFS ET ENJEUX.....	15
<b>PRESENTATION DU SITE .....</b>	<b>18</b>
1. SITE D'ETUDE : DRAIX.....	18
2. MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU MOULIN.....	20
3. INSTRUMENTATION DU TORRENT DU MOULIN.....	21
4. COMPORTEMENT SAISONNIER DU CHENAL .....	23
<b>METHODOLOGIE .....</b>	<b>26</b>
1. DONNEES BRUTES .....	26
2. VIDANGE DE LA TRAPPE .....	27
3. TAMISAGE GRANULOMETRIQUE .....	29
4. TRAITEMENT DES DONNEES.....	30
<b>RESULTATS.....</b>	<b>36</b>
1. GRAPHIQUES PAR EVENEMENTS .....	36
2. FLUX CHARRIE EN FONCTION DES CONTRAINTES HYDRAULIQUES .....	40
3. ÉVOLUTION GRANULOMETRIQUE EN FONCTION DE LA FORCE TRACTRICE .....	44
4. ÉVOLUTION DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES.....	49
<b>DISCUSSION.....</b>	<b>54</b>
1. COMPARAISON NAHAL ESHTEMOA.....	54
2. CONSEQUENCES DE L'OUVERTURE A 8CM ET DES AILETTES .....	56
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>58</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>59</b>
<b>TABLE DES FIGURES.....</b>	<b>62</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>64</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>66</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>70</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>70</b>



# INTRODUCTION GENERALE

---

1. CONTEXTE GENERAL
2. ÉTAT DE LA RECHERCHE
3. OBJECTIFS ET ENJEUX

# INTRODUCTION GENERALE

## 1. CONTEXTE GENERAL

Sous l'effet de l'érosion, les montagnes telles que nous les connaissons sont vouées à disparaître à plus ou moins long terme. Lentement, à notre petite échelle de temps, ces majestueuses formes géologiques sont érodées. Un des acteurs principaux de cette érosion est l'eau. Agent de transport, l'eau arrache une particule à un point pour l'exporter, la transporter, la déposer, la remobiliser... Jusqu'à 60% du flux total de sédiments dans les rivières et torrents est transporté par charriage (Dadson et al., 2003; Meunier et al., 2006) même s'il reste très variable, pouvant descendre jusqu'à une proportion de 10% (Lenzi et al., 1999). Ce mode de transport influe la morphologie et la dynamique du lit et sa compréhension est nécessaire pour décrire l'exportation des matériaux hors des bassins.

Les crues des petits bassins versants de montagne sont souvent soudaines et violentes. Le transport solide joue un rôle prépondérant et peut avoir d'importantes conséquences sur les infrastructures. Paradoxalement, les données restent peu nombreuses dans la littérature. Ces événements étant soudains, difficilement prévisible et localisés, leur étude reste complexe. Face à ces fortes contraintes en condition naturelles, les scientifiques ont réalisés de nombreuses simulations numériques et études en laboratoire. Les données acquises sur le terrain restent donc rares. L'instrumentation du site de Draix, avec un personnel sur place, permet de palier à ces difficultés.

Dans le cadre de ce manuscrit, seul le torrent du Moulin sera étudié, et ce grâce à la trappe à fente et aux chaînes d'érosion. Au contraire des préleveurs de charge de fond (type Helley-Smith) cette trappe à fente, la première installée en France, permet d'obtenir une mesure du transport par charriage en continu en un point donné et ce sans le besoin d'être présent au moment même de la crue. Ce travail doit permettre de compléter les recherches sur la formation du transport par charriage. La granulométrie des sédiments charriés est mesurée afin de l'associer à un pas de temps et donc aux contraintes hydrauliques associées.

## 2. ÉTAT DE LA RECHERCHE

Les études des changements de nature des processus de transport associé à l'évolution de la granulométrie de la charge de fond ont principalement été réalisées en laboratoire, dans des canaux. De plus, les études sur le terrain pouvant se révéler dangereuses en crues, celles-ci se



trouvent limitées à de courtes observations avec de faibles gammes de forces de cisaillement et de faibles flux solides (Powell et al., 2001). C'est pourquoi nos données et nos outils (trappe à fente et chaînes d'érosion) sont importants pour l'apport aux données déjà existantes.

Cet état de l'art sera articulé autour des connaissances sur la charge de fond et sa mobilité ainsi que sur la mesure du transport par charriage via une trappe à fente ou « Birkbeck bedload sampler » (Reid et al. 1980). Les résultats issus des données collectées sur l'Eshtemoa en Israël (Powell et al., 2001) seront explicités afin de les comparer avec nos recherches.

## 2.1. GENERALITES

### 2.1.1. LE TRANSPORT PAR CHARRIAGE

La définition précise du charriage diverge selon les auteurs. Mais la plus communément admise est le transport solide qui reste en contact avec le fond du lit (roulement/glissement), y compris la saltation, en opposition à la suspension où les sédiments ne sont jamais en contact avec le fond (Fig. 1).

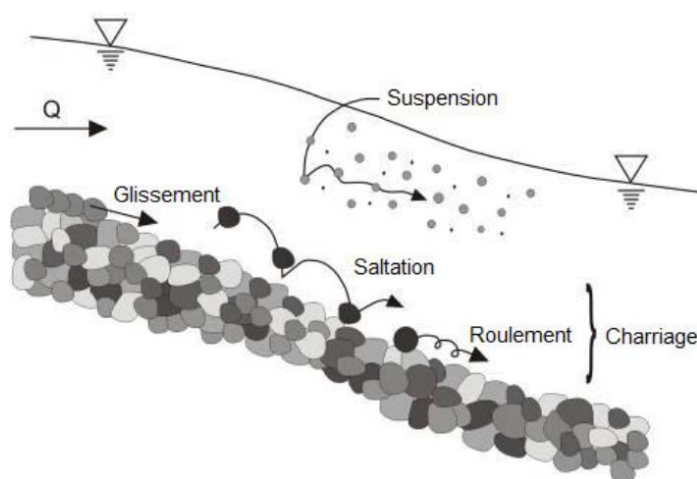


Figure 1: Représentation schématique des modes de transport (Degoutte, 2004)

Graf et Altinakar (1996) parlent de « mouvements des particules restant en contact étroit avec le fond ; elles se déplacent en glissant, roulant ou sautant (brièvement) ; ce mode de transport concerne les particules relativement grandes ». La charge de fond peut-être mobilisée par roulage des particules individuelles, par mise en mouvement en paquet de l'ensemble des matériaux du fond du lit ou par saltation (Bravard et Petit, 1997). Bagnold (1973) distingue les particules en glissement ou roulement avec un déplacement relativement lent au contact du lit, des particules en saltation à une vitesse relativement grande. La vitesse des particules est bien plus lente que celle de l'eau (Liébault et al., 2010). Frey (2008) parle d'un phénomène biphasique: « la vitesse moyenne de

la phase solide est inférieure à la vitesse moyenne de la phase fluide ». Enfin, il précise qu'il est préférable d'utiliser le terme de charriage plutôt que de charge de fond, puisque dans le cas des torrents de montagne à forte pente et faible hauteur d'eau le charriage peut occuper la majorité voir la totalité de la colonne d'eau. Des particules charriées peuvent même émerger et il devient inadapté d'utiliser le terme de charge de fond dans ce cas.

### 2.1.2. MISE EN MOUVEMENT

La littérature s'accorde pour dire qu'une plus grande force d'écoulement est nécessaire pour mobiliser les matériaux les plus grossiers du lit (Ferguson et al., 1989 ; Komar et Shih, 1992). Wilcock et al. (2009) précisent que la taille importe de deux façons. La première est que les particules grossières sont plus difficiles à transporter que les particules plus fines (il faut moins de force d'écoulement pour transporter un grain de sable qu'un bloc). Il parle « d'absolute size effect » que l'on traduira par l'effet de taille absolue. La deuxième est que les grains les plus fins au sein d'un lit composé de tailles de grains variables seront plus difficilement mobilisables que dans un lit composé de grains similaires. Inversement, les particules grossières seront plus facilement mobilisables dans un lit composé d'une large gamme de taille de grain que dans un lit composé de grains de tailles similaires. Il parle de « relative size effect » que nous traduirons par l'effet de taille relative. Après un rapide examen des torrents, il s'avère que, généralement, une large gamme de taille de matériaux est présente dans le lit (Wilcock et al. 2009).

Le diagramme de Hjulström (Fig. 2) permet d'apporter des précisions quant à la force nécessaire pour mobiliser diverses tailles de grains.

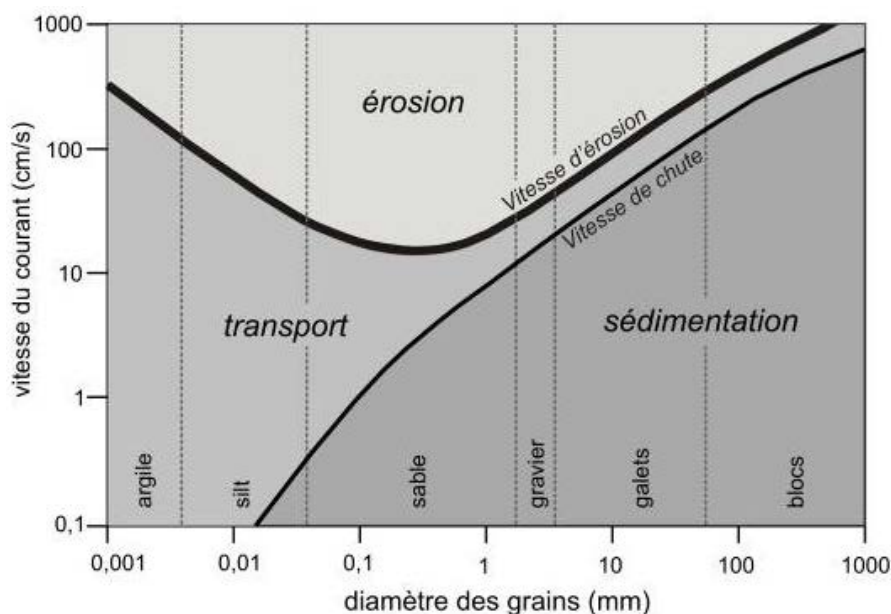


Figure 2: Diagramme classique de Hjulström (Degoutte, 2004)

Les grains d'une taille d'environ 0,1 à 0,5 mm sont les plus facilement mobilisables avec une vitesse de 10 cm/s. Au-dessus et en dessous de ces valeurs de taille des grains, il est nécessaire d'avoir plus de force pour les mobiliser, donc des vitesses de courant plus élevées. S'il semble logique le besoin de vitesses de courant de plus en plus importantes pour entraîner les particules de plus en plus grosses, ça l'est beaucoup moins pour les particules fines. La force de cohésion des matières fines est plus importante et demande donc une contrainte plus élevée pour être arrachées et mises en mouvement. Mais une fois arrachées, celles-ci s'écouleront plus rapidement que les plus grosses particules.

La mobilisation de toutes les tailles de matériaux est possible selon une gamme de vitesse d'écoulement (Wilcock et McArde, 1993). Par conséquent, à des niveaux modestes de vitesse d'écoulement, le taux de matériaux grossiers transportés est inférieur au taux de matériaux fins. Aussi, la charge de fond transportée est souvent plus fine que les matériaux au fond du lit. Puis, plus le débit augmente, plus les matériaux grossiers sont entraînés, jusqu'à ce que la granulométrie de la charge de fond coïncide avec les matériaux du fond du lit (Wilcock, 1992).

### 2.1.3. MOBILITE EQUIVALENTE

On parle de mobilité équivalente lorsque les particules fines et grossières bougent toutes ensembles et ce pour des conditions hydrauliques très vigoureuses (Frey, 2008). Les plus grosses particules, dans un lit de taille de grains hétérogènes sont surexposées à de plus grandes forces d'écoulement (que si elles avaient été entourées de particules de même taille) et inversement, les petites particules sont sous un effet de masquage par les plus grosses. C'est donc l'hétérogénéité du tri granulométrique dans le lit qui explique la mobilité équivalente.

La mobilité équivalente entre les fins et les grossiers doit s'exprimer à partir d'un certain seuil de contrainte hydraulique, qui selon les données de Powell et al. (2001) est de 4,5 fois la contrainte critique de mise en mouvement.

## 2.2. LES TECHNIQUES DE MESURE DU CHARRIAGE

De nombreuses techniques de mesure du transport de la charge de fond existent. Les paragraphes suivant détailleront succinctement les principales techniques.

### 2.2.1. LES TECHNIQUES DE MESURE DIRECTES

La **mesure par préleveurs de type Helley and Smith** (ou « filets à papillons ») est l'une des techniques les plus vieilles et les plus répandues (Mühlhofer, 1933 ; Helley and Smith, 1971) en particulier dans le cas des échantillonneurs LHS, Large Helley-Smith (Fig. 3). Le principe est

simple : un filet est fixé sur un cadre métallique et le tout est posé sur le fond du lit du cours d'eau. La taille du filet détermine le volume maximum échantillonnable et la maille de celui-ci conditionne la taille minimale des matériaux collectés. Quant à la taille maximale des matériaux elle correspond à la largeur d'admission du cadre métallique. Après prélèvement, les sédiments sont séchés, tamisés et pesés. Le temps de mesure et la largeur d'admission étant connus, le taux de transport spécifique peut-être calculé.

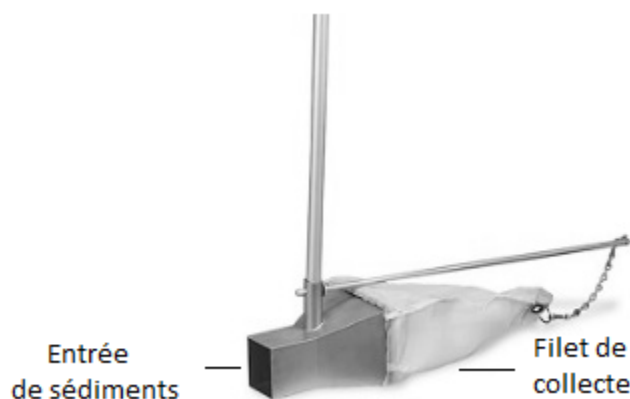


Figure 3: Échantillonneur classique Large Helley-Smith ([www.foresty-suppliers.com](http://www.foresty-suppliers.com))

Il existe aussi différents modèles (TIWAG, Vent, BUNTE) qui peuvent être utilisés selon les conditions du cours d'eau. De plus, alors que la plupart sont suspendus (à la main ou par grue) d'autres peuvent être fixés sur le fond du lit (BUNTE) dans des écoulements de faible intensité (Bunte et al., 2007).

La **mesure via les bassins de rétentions** qui fonctionne comme un grand piège à sédiment et conserve tous les matériaux charriés par le cours d'eau. Selon leur construction (pas de modèle précis), elles peuvent permettre de mesurer le transport par charriage.

La **mesure par trappe à fente** est un système comportant un caisson implanté dans le cours d'eau avec une fente permettant l'entrée des sédiments charriés. L'emplacement est prédéfini dans une section (Reid et al., 1980). Ce système sera abordé en détail dans la partie 1.3.

#### 2.2.2. LES TECHNIQUES DE MESURES INDIRECTES

La **mesure par traceurs** consiste à suivre le déplacement de particules préalablement marquées. Deux techniques de mesure par traceurs sont possibles. La première est dite passive, le traceur doit être vu par l'homme ou trouvé par un détecteur. La seconde est dite active, le traceur émet des ondes ou des rayons détectés par un spectromètre ou un récepteur. Les principales mesures se font avec traceurs peints, des revêtements de traceurs fluorescent ou ferrique, des traçages par radioactivité, par magnétisme (naturel ou non), par transpondeurs passifs (PIT tags)

ou encore par émetteurs radio (Hassan and Ergenziger, 2003). Le tableau d'Hassan et Ergenziger (2003) montre les avantages et inconvénients de chaque type de mesure par traceurs.

Les **géophones** permettent de mesurer l'intensité du charriage avec les vibrations produites par les matériaux impactant une plaque de fer. L'**hydrophone** quant à lui mesure le charriage grâce aux impacts des cailloux en mouvement. Ces techniques relativement récentes rencontrent comme principal problème la difficulté de calibration (Recking et al., 2013).

Les **chaînes d'érosion** permettent de connaître une épaisseur de couche mobilisée, que ce soit en érosion ou en dépôt. Cependant, pour avoir une valeur de flux, il faut forcément les associer à des traceurs pour avoir un ordre d'idée du déplacement moyen des sédiments (Recking et al., 2013). Dans les méthodes qui permettent de connaître les changements d'élévation de surface il existe aussi la télédétection par laser (LIDAR), la photogrammétrie ou encore les GNSS (*Global Navigation Satellite System*) différentiels. Ces dernières peuvent s'appliquer dans le chenal ou encore dans des volumes stockés au sein d'ouvrages.

## 2.3. LA TRAPPE A FENTE

### 2.3.1. PRINCIPES

Cette méthode de mesure du charriage consiste en l'implantation d'une trappe à fente dans le lit du cours d'eau. Cette mesure d'entrée de sédiments par la fente se fait grâce à deux capteurs (Fig. 4). Le caisson repose sur un coussin contenant un capteur de pression (*pressure pillow*) mesurant la pression hydrostatique, la pression du caisson et l'entrée de sédiments. Un autre capteur disposé le long du caisson (*pressure sensor*) mesure seulement la pression hydrostatique. En faisant la différence entre ces deux capteurs (la distance entre les deux étant connu et fixe) nous obtenons l'augmentation de pression induite par les sédiments qui se déposent dans le caisson. À noter qu'il existe, certes, une dérive possible des capteurs de pression, mais que celle-ci est bien trop minime pour influencer nos objectifs de mesure.

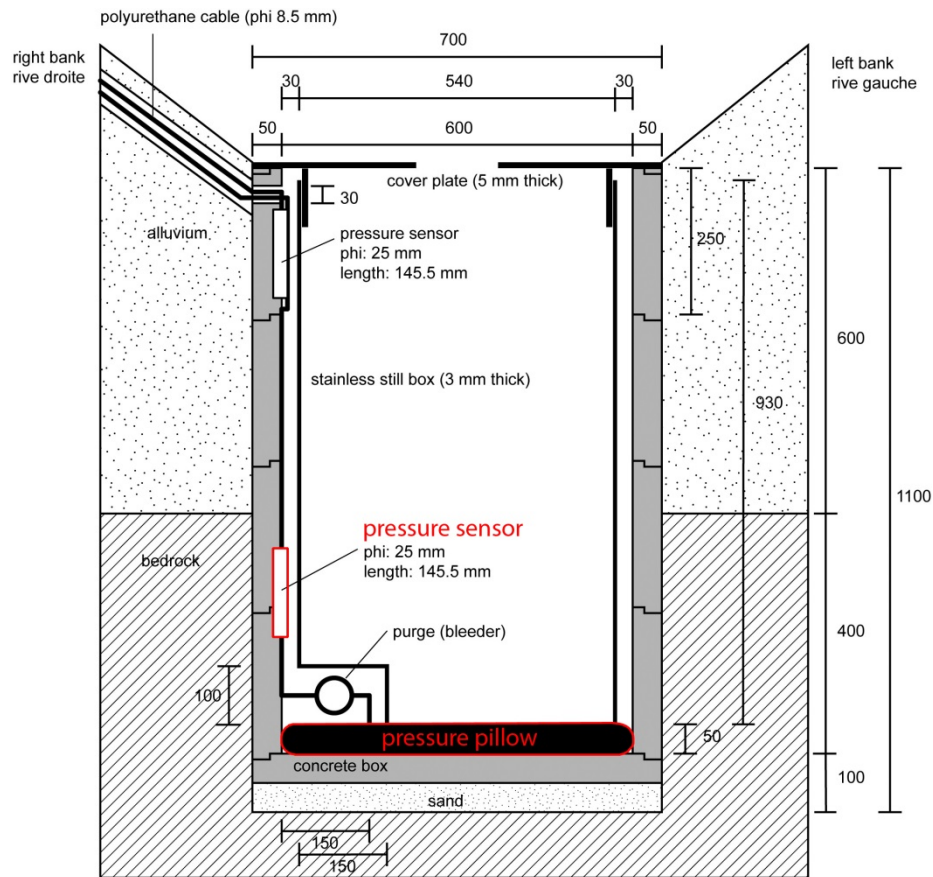


Figure 4: Schématisation de la trappe à fente de Draix (Liébault, 2011)

### 2.3.2. AVANTAGES

Il est plus complexe d'obtenir des données sur le transport solide que sur les pluies et/ou les ruissellements en partie à cause des problèmes de mise en route des préleveurs d'échantillons mais aussi des relevés de plage de dépôts qui, dans la plupart des cas, correspondent à la production d'érosion d'une succession de crues (Borges, 1993). Le principal avantage de ce système est qu'une fois la trappe installée, seule la maintenance après chaque crue (mobilisant une seule personne) est nécessaire. De plus, le système fonctionne en continu, il n'y a donc pas d'instruments de mesure à mettre en route au début de la crue. Enfin, la mesure se faisant en continu, il est possible de retrouver, dans le temps, une masse de sédiment donnée, sa situation dans la trappe (en hauteur) et sa granulométrie (faite ultérieurement).

Cette technique de mesure est aussi très appréciable pour sa simplicité d'utilisation et ce peu importe l'intensité des écoulements. Toutes les gammes d'écoulements sont mesurables et il n'est pas plus complexe de mesurer les crues que de plus faibles événements.

Enfin, ce système permet de séparer la charge de fond de la charge en suspension. Forcément, des matières en suspensions peuvent se retrouver dans la trappe mais les quantités ne seront pas assez importantes pour biaiser les résultats bruts (Powell et al., 2001).

### 2.3.3. INCONVENIENTS

La nécessité de l'aménagement d'un ouvrage de génie civil pour l'installation d'une trappe est le principal inconvénient de cette méthode de mesure (Recking et al., 2013). Il est nécessaire de creuser un trou et de le bétonner ; il faut donc détourner temporairement l'écoulement si celui-ci est pérenne ou attendre une période propice si l'écoulement est intermittent. De plus, il peut être utile d'aménager sur place un palan pour faciliter la maintenance de la trappe une fois remplie et ne pas mobiliser une grue à chaque événement. Ce système est plus coûteux lors de la première installation. Mais une fois celle-ci faite, l'intervention se fait simplement et sans coûts par une seule personne. Enfin, il est nécessaire d'avoir une section contrôlée afin que l'écoulement soit le plus possible au droit de la trappe.

Un autre des inconvénients, dans la littérature, est le rapide remplissage en cas de fortes crues (environ 10min). Le volume limité de la trappe est un inconvénient majeur (Lucia et al., 2013). Cependant, il faut noter que l'épisode maximal des « flash flood » est la plupart du temps inférieur à 20 mn, ce qui donne une gamme assez large d'enregistrement (Powell et al., 2001). Mais dans notre cas, pour le site expérimental de Draix, nous avons constaté des temps de remplissage allant de 20 minutes à plusieurs heures. Dans la plupart des cas, nous avons enregistré le pic de crue. Il est nécessaire d'aller vider la trappe après chaque crue, même de faible intensité, sinon dans notre cas, il est possible de ne pas avoir le pic de crue du prochain événement.

## 2.4. DONNEES COLLECTEES PAR UNE TRAPPE A FENTE

L'article de Powell et al., 2001, est celui qui apporte la comparaison la plus facile avec les graphiques que nous présenterons dans ce manuscrit. Leur site d'étude est le Nahal Eshtemoa, en Israël, sur les flancs sud-ouest des « Hebron Hills ». Comme pour le site du Moulin à Draix, l'écoulement n'est pas pérenne et le cours d'eau est sujet aux crues éclairs. Leurs données de transport solide sont obtenues avec 5 trappes Birkbeck indépendantes.

Dans leur article, Powell et al. (2001) concluent qu'à faible écoulement, 57% de la charge est composée de sable et de granules. Le reste est dominé à 38% par des graviers fins et seulement 4% de matériaux sont plus gros que 25 mm. Lorsque la force de cisaillement augmente les gros graviers et les cailloux fins sont plus représentés, alors que le taux des sables et des granules



diminue. Seuls les graviers fins ont toujours la même représentation peu importe la variabilité de l'écoulement. Au-delà d'un  $\tau/\tau_c$  (Taux de transport sur taux de transport critique soit la valeur minimale pour laquelle une particule est mise en mouvement) de 4,5, jusqu'à la limite des données ( $\tau/\tau_c = 8,5$ ), la distribution granulométrique reste assez similaire, avec environ  $\sim 25\%$  de sables et grains,  $\sim 67\%$  de graviers, et  $\sim 8\%$  de cailloux.

Pour évaluer l'évolution vers les tailles grossières de la charge de fond, Powell et al. (2001) utilisent les percentiles. Ils ont choisi différents percentiles, notés Dx, le 16ème, le 50ème et le 84ème (D16, D50 et D84). La taille médiane des particules (D50) dans la distribution augmente de  $\sim 3$  mm ( $\tau/\tau_c$  minimal) à  $\sim 12$  mm ( $\tau/\tau_c > 4,5$ ).

La granulométrie du charriage et des matériaux du lit est quasi équivalente à partir d'une force de cisaillement 4.5 fois supérieure à la valeur critique de mise en mouvement. C'est pour cette valeur qu'ils trouvent la mobilité équivalente des plus fins aux plus grossiers.

La distribution de la taille des matériaux transportés par charriage durant un unique événement devrait donc varier avec l'amplitude de l'événement et la durée de l'écoulement. La charge des sédiments évacués sur une saison des crues devrait donc aussi refléter l'éventail des écoulements (Powell et al., 2001).

Selon Powell et al. (2001) une analyse de la répartition spatiale des taux de transport en charge de fond (Powell et al., 1999) indique que ceux-ci sont deux fois plus importants au niveau du chenal central que sur les bords. Il s'agit là d'une variation dans la contrainte de cisaillement générée par les frottements sur les parois. Ces résultats confirment l'étude en laboratoire. Nous ne pourrions pas comparer nos résultats sur ce point puisque nous n'avons qu'une trappe, alors qu'ils en utilisent 5 sur un transect du lit.

### **3. OBJECTIFS ET ENJEUX**

La problématique générale des études faites à Draix sont les deux problèmes principaux qui sont imputables aux marnes noires présentent en amont de la Durance. La conséquence de leur forte susceptibilité à l'érosion est l'exhaussement du lit de la Durance et l'envasement des barrages. Les sédiments produits par les ravines marneuses en amont de la Durance sont transportés à l'aval où la pente devient de plus en plus faible et donc plus propice à l'accumulation. Cette accumulation et donc l'exhaussement du lit, entraîne une menace d'inondation de plus en plus forte puisque le différentiel de hauteur entre le lit et les berges ou digues se réduit, années après années. D'après Brochot (1993) 44% des sédiments fins de la Durance sont imputables aux bassins versants



marneux des Terres Noires. La meilleure compréhension des phénomènes de transport semble donc essentiel afin d'espérer contrôler l'apport de sédiments dans la Durance (Rey et al., 2004). En raison de la rapide désagrégation des marnes, l'étude du charriage est nécessaire puisque ces matériaux seront les futures matières en suspension de la Durance, en aval. C'est dans cette problématique générale que s'inscrit ce stage.

La problématique qui encadre plus particulièrement ce sujet concerne les relations entre les contraintes hydrauliques et la granulométrie (taille) des sédiments charriés et récoltés dans la trappe. L'objectif est d'apporter de nouvelles connaissances sur la granulométrie du charriage. Nous nous intéresserons tout d'abord aux relations entre la force de l'écoulement et le flux solide. Est-ce qu'une plus grande contrainte entraîne forcément des flux solides plus importants ? La saison influence-t-elle ces résultats ? La modification de l'ouverture de la trappe à fente modifie-t-elle le flux solide pour des contraintes hydrauliques identiques ? Puis nous verrons les relations entre les contraintes hydrauliques et les fractions granulométriques. Comment ces fractions réagissent en fonction de la modification des taux de transport ? Est-ce que plus le taux de transport est important, plus la granulométrie est grossière ? Un seuil de mobilité équivalente entre les fins et les grossiers est-il visible ? Enfin, nous nous poserons les mêmes questions avec les relations entre les contraintes hydrauliques et la taille du D50 et du D90. De nombreuses questions découlent de ce sujet et la recherche de réponses articulera ce manuscrit.

# PREMIERE PARTIE : PRESENTATION DU SITE

---

1. SITE D'ETUDE : DRAIX
2. MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU MOULIN
3. INSTRUMENTATION DU TORRENT DU MOULIN
4. COMPORTEMENT SAISONNIER DU CHENAL

# PRESENTATION DU SITE

## 1. SITE D'ETUDE : DRAIX

### 1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CONTEXTE

L'ORE Draix-Bléone est un Observatoire de Recherche en Environnement depuis 2002, consacré à l'étude des processus hydrologiques et érosifs en montagne. Draix est situé à 15km au Nord-Est de Digne, dans les Alpes-de-Haute-Provence, dans les Préalpes du Sud (Fig. 5).

Cet Observatoire de Recherche en Environnement est, entre autres, suivi par l'IRSTEA, soit l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, anciennement CEMAGREF. Deux unités de recherche de Grenoble, EM (Espace Montagnards) et ETNA (Érosion Torrentielle, Neige et Avalanches) ont des recherches en cours sur ce terrain d'étude. C'est dans cette dernière unité que ce stage s'inscrit.

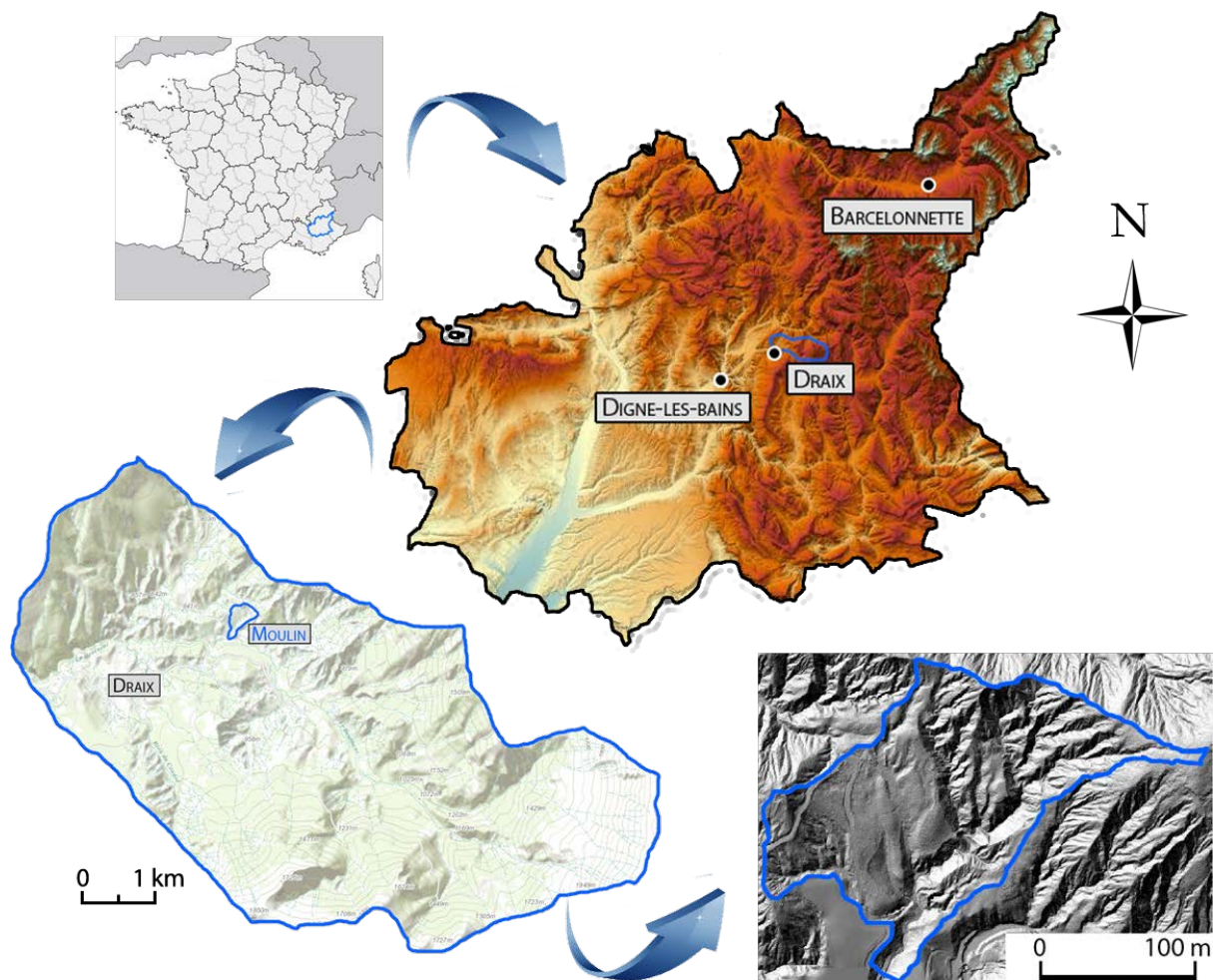


Figure 5: Situation géographique du site d'étude de Draix et du Moulin

C'est en 1983, sur les communes de Draix et du Brusquet que des petits bassins versants ont été équipés pour contribuer aux connaissances sur l'érosion, l'hydrologie, la végétation en territoire de montagne. Ce laboratoire de terrain a permis de développer des recherches portant sur l'hydrologie, l'hydraulique torrentielle, l'altération des roches et les flux de matériaux, les mouvements de versant, les effets de la végétation sur l'érosion et les crues. Autour de ce laboratoire de terrain, un Groupement d'Intérêt Scientifique, le GIS Draix, formé en 1999, conduit des travaux de recherche pluridisciplinaires.

Chaque bassin a été équipé, entre 1984 et 1987, de sections de contrôle, de limnigraphes, d'une plage de dépôt et de préleveurs d'échantillons de matières en suspension. Les 5 bassins versants observés sont variés en termes de dénivelé (de 30 à 460 m), de pente moyenne (30 à 75%), de surface (0,13 à 108 ha) et de taux de terrain nu (13 à 79%). Cette diversité dans les caractéristiques physiques des bassins versants (Tab. 1) permet de comparer les résultats entre eux et de recherches des facteurs influents dans l'érosion, la recharge sédimentaire ou encore le transport solide.

Bassin	Surface (ha)	Taux de terrain nu (%)	Pente moyenne (%)	Altitude min-max (m)	Observé depuis
Roubine	0.133	79	75	850-885	1983
Moulin	8.9	54	30	850-925	1988
Laval	86	68	58	850-1250	1984
Brusquet	108	13	53	800-1260	1987

Tableau 1: Principales caractéristiques physiques des bassins (Mathys, 2006)

## 1.2. GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE

Les bassins versants expérimentaux de l'ORE Draix sont incisés dans les formations jurassiques du bassin rhodanien. Il s'agit de marnes noires allant du Bathonien à l'Oxfordien. De manière générale, nous regrouperons ces formations sous le terme de « Terres noires ».

Les marnes sont constituées d'argile, de calcaire et de schistes, dans des proportions qui peuvent fortement varier. On peut parler de calcaire argileux (calcaire dominant) ou de marnes argileuses (marnes dominantes). Elles se sont constituées par accumulation, durant l'ère secondaire, au fond des mers. Ces mers se retrouvent aujourd'hui en altitude suite à l'orogénèse alpine.

Les marnes noires connaissent les érosions parmi les plus importantes, pouvant aller jusqu'à plusieurs centimètres par an. Dans les Alpes du Sud, la moyenne se situe autour d'un à deux centimètres par an, en terrain dénudé. Cette forte érosion favorise le développement des « badlands », soit des ravines dénudées (Fig. 6).



Figure 6: "Badlands" du Moulin et du Laval, vu depuis le sommet du Cucuyon

## 2. MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU MOULIN

Le bassin versant du Moulin représente une surface de 8,9 ha, soit 10 fois plus petit que celui du Laval dont il est contigu dans sa partie aval. Le Moulin est un affluent du Bouinenc. Ce bassin culmine à 985 m et la station de mesure se situe à 849 m.

La formation géologique principale est de type autochtone, avec un profil d'altération formé in situ. Il s'agit de marnes et d'altérites de marnes concernant tout le chenal d'écoulement principal ainsi que le réseau de ravines (Fig. 7).

L'érosion liée au ruissellement est très remarquable, formant de nombreuses ravines avec un profil en V. En amont du bassin du Moulin, le réseau hydrographique est très dense, les méandres serrés et les ravines côtes à côtes et visibles pratiquement jusqu'aux lignes de crête (Mathys, 2006).

On parle de paysage de « badlands » ou « mauvaises terres » pour décrire la géomorphologie des ravines de Draix (terme appliqué à tout paysage et forme d'érosion similaire). Autant dire que la végétation et l'agriculture y seront peu présentes, la reconquête forestière est compliquée par la forte pression exercée par l'érosion intense.



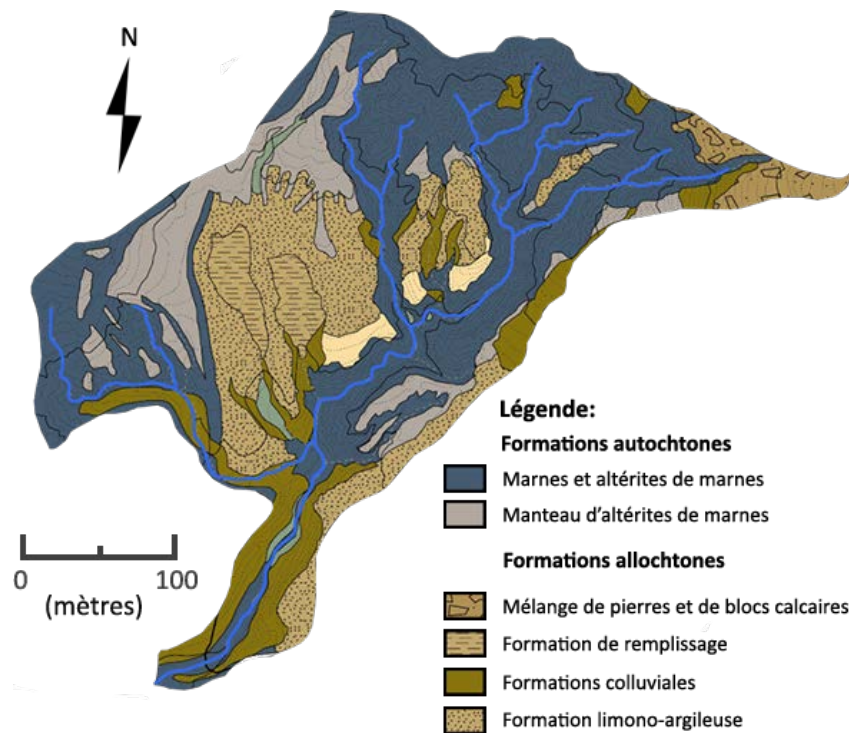


Figure 7: Carte des formations superficielles du bassin versant du Moulin (ULP modifié)

### 3. INSTRUMENTATION DU TORRENT DU MOULIN

Le torrent du Moulin est équipé d'une station type, avec des mesures de hauteur d'eau, des prélèvements d'échantillons et une plage de dépôts (Fig. 8).

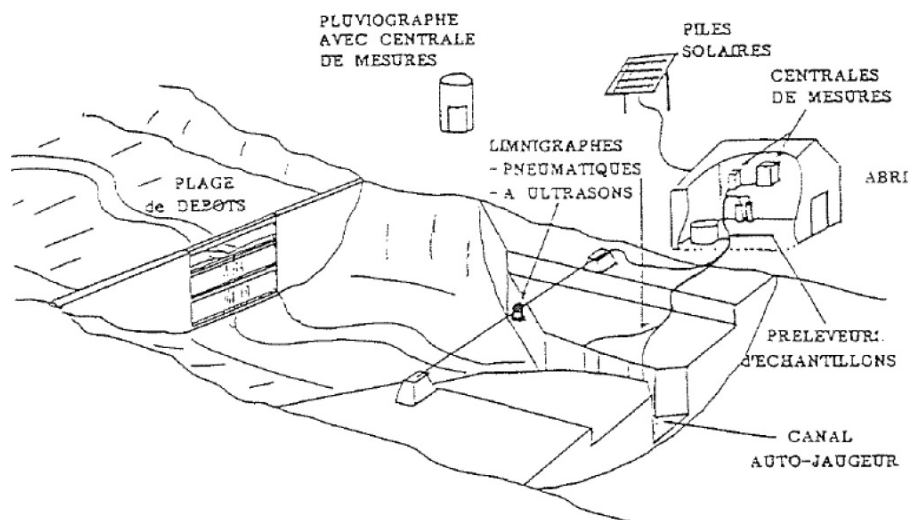


Figure 8: Station type, d'après Mura, R. et al., 1988

La **plage de dépôts** située à l'exutoire du bassin versant permet d'arrêter une grande partie du transfert de matériaux dans le but principal de réduire le flux sédimentaire et de mesurer le volume de sédiments charriés par une crue. Il est cependant nécessaire de faire les mesures après chaque crue.

Les **mesures de hauteur d'eau** se font grâce au seuil trapézoïdal et au seuil Parshall. Deux mesures de hauteur d'eau sont donc disponibles en aval de la trappe. Ces ouvrages permettent aussi de connaître le débit en y appliquant des lois hydrauliques décrites dans la partie « Méthodologie ». Ces deux mesures peuvent être comparées à une troisième mesure de hauteur d'eau qui se fait avec les capteurs de la trappe à fente.

La **trappe à sédiments**, décrite précédemment, est l'originalité de l'instrumentation de ce bassin versant.

Quatre-vingts **chaînes d'érosion** ont été installées sur 40 transects. La répartition s'est faite selon la largeur du lit mais aussi de sa morphologie (présence de bancs, de blocs, d'affluents). Ces chaînes d'érosion permettent de mesurer la respiration du lit, soit les phases de dépôt et d'érosion (Fig. 9). Ces fluctuations résultent du déplacement des matériaux provisoirement stockés dans le lit. Ces déplacements sont actifs sur une certaine profondeur que l'on appelle la couche active. Les relevés doivent donc être impérativement faits après chaque événement.

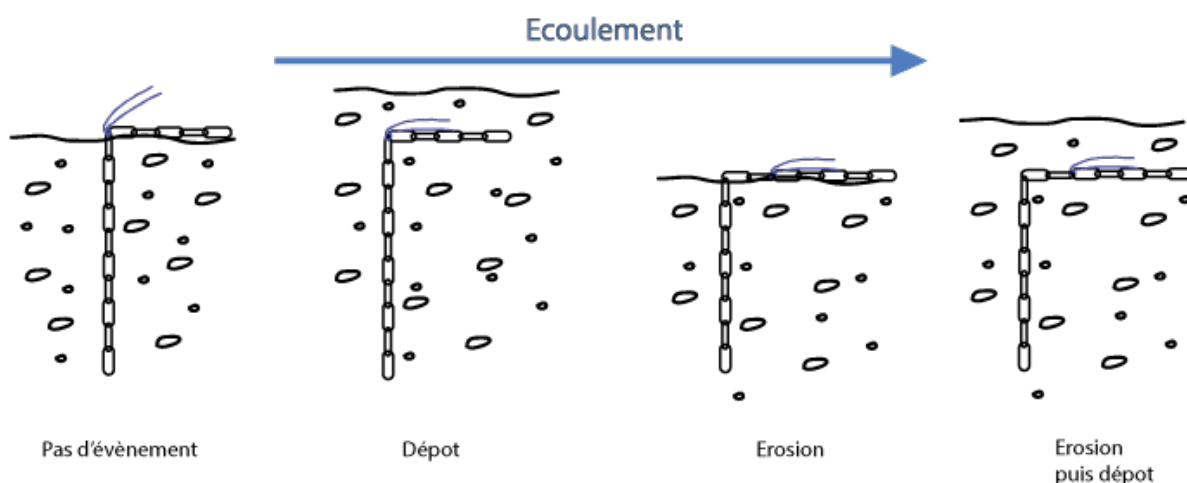


Figure 9: Représentation schématique des situations possible lors d'un relevé de chaînes

Comme visible sur la figure 9, il est très facile de connaître l'érosion, le dépôt, mais aussi l'érosion puis le dépôt dans un même événement. Dans le cas d'un dépôt simple, le coude de la chaîne, matérialisée par une ficelle bleue avant l'événement, ne se modifie pas, seule une couche de sédiment recouvre cette chaîne. Il n'y a qu'à retrouver la chaîne et mesurer le dépôt sur celle-ci. Dans le cas où il y'a eu érosion au-dessus de la chaîne, celle-ci est visible et la ficelle n'est plus au

niveau du coude. La mesure de l'érosion se fait entre la ficelle et le coude. Enfin, dans le cas d'une érosion puis d'un dépôt, les mesures sont les mêmes que précédemment. La difficulté est de retrouver la chaîne, puis enlever le dépôt sur celle-ci afin de ne pas modifier le coude pour pouvoir mesurer aussi l'érosion. Cependant, le scénario d'un dépôt puis d'une érosion pose problème. Si le dépôt est supérieur à l'érosion, seul le dépôt restant après érosion est mesurable. Si le dépôt est inférieur à l'érosion, seule l'érosion par rapport à l'état initial est mesurable.

Ces chaînes d'érosion nous permettent d'étudier de façon plus simple la respiration saisonnière du lit.

#### 4. COMPORTEMENT SAISONNIER DU CHENAL

Draix est sous l'influence d'un climat subméditerranéen (Robert, 2000), avec une sécheresse visible l'été et ponctuée d'orages. Les maximums de précipitation se situent au printemps et à l'automne, alors que les mois d'été et d'hiver sont relativement secs. Ces précipitations peuvent dépasser les 60mm/h assez couramment (Borges, 1993), entraînant des crues soudaines et violentes. Mais de façon générale, les précipitations sont assez courtes et d'intensité moyenne. Les précipitations moyennes annuelles sont de 900 mm. Les hivers sont froids mais peu enneigés. Un gel important de décembre à mars est visible, avec de fréquents dégels journaliers (Mathys, 2006).

Au cours de l'hiver, l'alternance gel-dégel favorise la formation d'altérites de marnes (Fig. 10). Ces altérites vont combler les ravines des versants et former des tabliers au pied de ces derniers (Fig. 11). Ces altérites de marnes participent principalement à la recharge sédimentaire du torrent du Moulin et conditionne en grande partie le comportement saisonnier de celui-ci.



Figure 10: Altérites de marnes sur un versant



Figure 11: Accumulation d'altérites en pied de versant



Au printemps commencent, de façon générale, les premiers épisodes pluvieux assez intenses pour mobiliser les matériaux des rigoles et des pieds de versants. Si les épisodes sont très intenses, des dépôts très importants seront relevés dans la plage de dépôt. Dans le cas contraire, des stocks intermédiaires se forment où s'accroissent.

Quand arrive l'été, le nombre et l'intensité des épisodes orageux augmentent. Lors de forts orages ou d'épisodes de grêle, des nouvelles altérites peuvent être formées et mobilisées. Des particules n'ayant pas été arrachées lors d'événements moins intenses pourront l'être lors d'orages violents. Ces crues étant souvent brèves, elles augmenteront encore les dépôts dans des stockages intermédiaires.

En automne, les productions des ravines et des versants sont moindres. La plupart de ces matériaux sont désormais dans le chenal où à l'exutoire. Les événements sont généralement moins intenses mais plus long et les écoulements ayant moins d'apports en amont éroderont désormais le chenal. Le bassin versant rentre dans sa phase de déstockage.

Ce fonctionnement théorique comporte des exceptions avec des périodes où l'intensité des événements normalement attendu ne correspond pas. Pour exemple, le 24 Décembre 2013 a été un des événements le plus intense depuis 30 ans à Draix alors qu'il s'est déroulé en plein hiver. Aussi, les phases d'érosion ou de dépôts progradent de l'amont vers l'aval et ne sont donc pas visible au même moment selon où l'on se place dans le bassin versant. Pour finir, depuis le début des mesures avec les chaînes d'érosion, le chenal à un stock de sédiments de plus en plus important, ce qui montre que les phases érosives déstockent moins que ce qu'accumulent les phases de dépôts (Fig. 12).

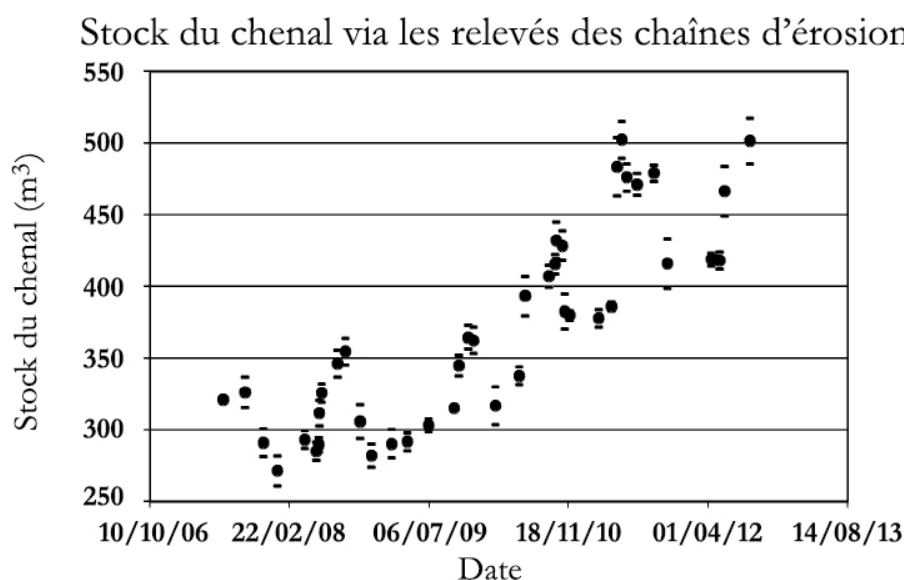


Figure 12: Graphique d'évolution du stock du chenal depuis les premiers relevés (Liébault, 2012)

## DEUXIEME PARTIE : METHODOLOGIE

---

1. DONNEES BRUTES
2. VIDANGE DE LA TRAPPE
3. GRANULOMETRIE
4. TRAITEMENT DES DONNEES

# METHODOLOGIE

## 1. DONNEES BRUTES

### 1.1. DONNEES DE LA TRAPPE

De manière continue, la trappe enregistre dans la centrale d'acquisition une série de données toutes les 10 secondes. Sur le Tableau 2 nous avons en colonne « A » l'heure et la date de l'enregistrement, en « B » la référence de la mesure, en « C » la pression du coussin (pression cumulée du caisson en inox, de l'eau et des sédiments), en « D » la pression hydrostatique. Quant à la colonne « E », elle n'est pas remplie automatiquement, nous la calculons en faisant le différentiel entre les deux pressions. C'est ce différentiel qui, lorsqu'il augmente, indique que la trappe se remplit de sédiments. Le choix du début de remplissage peut poser problème car les pressions varient légèrement même dans une situation stable. Il ne faut donc prendre que l'instant où le différentiel de pression augmente sensiblement et de manière continue. Une marge d'erreur est appliquée pour être sûr que la différence de mesure est liée à un processus physique et non à une dérive dans la précision des capteurs de mesure. Cette marge d'erreur est de 3,3mm pour notre capteur. Dans cet exemple, nous avons pris la ligne 314 comme début de remplissage, soit la référence de mesure « 3403412 » (Tab. 2).

	A	B	C	D	E
1	TIME	REF	PILLOW	WATER	DELTA
2	dd/mm/yyyy hh:mm:ss		cm H2O	cm H2O	cm H2O
312	26/10/2012 11:21	3403410	127	92,7	34,3
313	26/10/2012 11:21	3403411	127,1	92,8	34,3
314	26/10/2012 11:21	3403412	127,2	92,8	34,4
315	26/10/2012 11:22	3403413	127,3	92,7	34,6
316	26/10/2012 11:22	3403414	127,3	92,7	34,6
317	26/10/2012 11:22	3403415	127,4	92,7	34,7
318	26/10/2012 11:22	3403416	127,7	92,9	34,8
319	26/10/2012 11:22	3403417	128,1	93,2	34,9
320	26/10/2012 11:22	3403418	128,5	93,4	35,1
321	26/10/2012 11:23	3403419	128,9	93,7	35,2
322	26/10/2012 11:23	3403420	129,2	93,7	35,5
323	26/10/2012 11:23	3403421	129,4	93,8	35,6
324	26/10/2012 11:23	3403422	129,8	93,9	35,9
325	26/10/2012 11:23	3403423	130,1	93,9	36,2
326	26/10/2012 11:23	3403424	130,4	93,9	36,5
327	26/10/2012 11:24	3403425	130,5	93,9	36,6
328	26/10/2012 11:24	3403426	130,7	93,8	36,9
329	26/10/2012 11:24	3403427	131,2	94	37,2
330	26/10/2012 11:24	3403428	131,4	93,9	37,5
331	26/10/2012 11:24	3403429	131,7	93,9	37,8

Tableau 2: Extrait tableur Excel, feuille d'enregistrement de la trappe

La précision de mesure de hauteur d'eau est de +/- 1,2 mm et peut-être comparée aux données obtenues grâce aux seuils.

## 1.2. DONNEES DE HAUTEUR D'EAU

Deux sections de mesures sont utilisées dans le torrent du Moulin, un seuil Parshall et un seuil trapézoïdal. Le seuil Parshall est plus précis pour les débits importants alors que le seuil trapézoïdal est lui plutôt adapté aux faibles débits. La mesure se fait par un capteur fixé au droit d'un seuil. Il propage une onde qui se réfléchit sur la surface en eau et mesure la hauteur entre celle-ci et le capteur. La hauteur entre le fond du seuil et le capteur étant connu, il est possible d'en déduire la hauteur d'eau.

Le seuil permet d'avoir une loi hauteur d'eau/débit univoque : la courbe de tarage. Pour une hauteur  $h$ , il n'y a qu'un seul débit possible. Cette courbe est bien évidemment valable que pour cet ouvrage précis et n'est applicable pour une autre station de mesure que si le dimensionnement est identique. À la différence de la trappe, nous n'avons pas une valeur pour un pas de temps fixe mais une valeur à chaque changement de la lame d'eau.

## 2. VIDANGE DE LA TRAPPE

Lorsque la trappe est pleine, après un ou plusieurs événements, l'équipe sur place nous contacte pour nous en informer. Il est nécessaire d'y aller dans un laps de temps le plus faible possible afin de réduire la probabilité d'un autre événement pendant que la trappe est pleine et qui ne sera donc pas mesuré.

Avant de sortir la trappe, il est important de prendre des photos en amont et en aval de celle-ci afin d'obtenir une idée de la dynamique, de la granulométrie et du stock sédimentaire du lit depuis le dernier événement. Puis, il faut prendre soin de dériver l'écoulement (Fig. 13) afin de ne pas laisser des sédiments rentrer dans le « puits » où est installé cette trappe.



Figure 13: Dérivation de l'écoulement en rive droite lors d'une vidange de la trappe

Une fois le caisson sorti, une photo du dessus est prise afin d'avoir une image de la morphologie de l'accumulation des sédiments dans le caisson et une première idée de la répartition granulométrique sur la surface (Fig. 14).



Figure 14: Photographie de la trappe après l'événement du 06 Juin 2013

Une porte latérale permet d'extraire plus facilement les sédiments. Nous positionnons un mètre afin de pouvoir repérer des couches de 10 cm. Une photo est prise pour analyser la répartition spatiale des matériaux et différencier de visu d'éventuelles strates sédimentaires. Le sommet du dépôt est retiré puis environ 4 kg de matériaux sont conservés avec un retrait par pelle au centre du caisson (Fig. 15).



Figure 15: Photographie de la méthode d'extraction par couches de 10 cm

Puis nous retirons le reste de la couche, ici entre 80 et 90 cm afin que tous les sédiments restants sur le dessus appartiennent à la couche inférieure. Cette extraction par couche est à répéter neuf fois pour retirer les 9 couches de sédiments.

Une fois tous les matériaux retirés il est nécessaire de bien nettoyer l'intérieur de la trappe mais aussi du puits. En effet, de nombreuses particules fines arrivent à s'introduire dans celui-ci en passant sous la plaque recouvrant la trappe et arrivent donc au fond du puits. Une trop grosse quantité de matière fine pourrait entraîner des problèmes de mesure puisque la trappe ne reposerait plus complètement sur le coussin de pression. La trappe est désormais prête pour le prochain événement.

### 3. TAMISAGE GRANULOMETRIQUE

Afin de répondre au sujet quant à la compréhension de la variation granulométrique en fonction des forces d'écoulement il est nécessaire de réaliser un tamisage de nos couches extraites. Le tamisage granulométrique est l'action de passer les matériaux au sein de tamis avec des écartements de mailles différentes. Le choix de ces classes c'est fait en accord avec l'échelle granulométrique de Wentworth (1922).

#### 3.1. FRACTIONS GRANULOMETRIQUES

Selon l'échelle de Wentworth, nous avons des matériaux allant jusqu'à 64 mm donc 11 fractions granulométriques (Fig. 16). Celles-ci sont mesurées soit par tamisage, soit par gabarit granulométrique (Fig. 17) lorsque la taille des particules est supérieure à la taille de la maille de notre tamis le plus large.

Borne inf. (en mm)	Borne sup. (en mm)	Méthode de mesure
-	< 0,063	Tamisage
0,063	0,5	Tamisage
0,5	2	Tamisage
2	4	Tamisage
4	8	Tamisage
8	11,3	Gabarit granulométrique
11,3	16	Gabarit granulométrique
16	22,6	Gabarit granulométrique
22,6	32	Gabarit granulométrique
32	45	Gabarit granulométrique
45	64	Gabarit granulométrique

Figure 16: Classes granulométriques

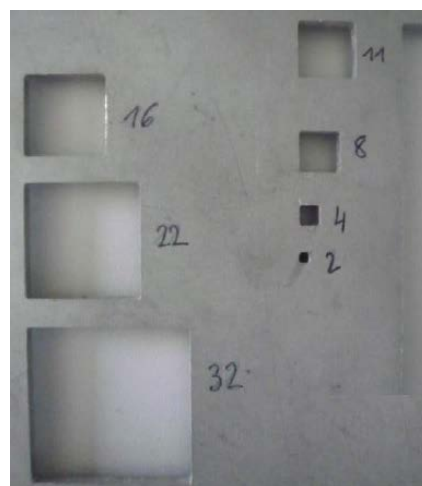


Figure 17: Gabarit granulométrique



La proportion de limons est le pourcentage de matière traversant le dernier tamis de 0,063 mm.

### **3.2. METHODOLOGIE DE TAMISAGE**

Préalablement au tamisage, il est nécessaire d'extraire les 5 particules les plus grosses de chaque couche. Ces données nous renseignent sur la taille des plus grosses particules transportées et sur la moyenne de cette taille. Nous mettrons ensuite ces données en relation avec les contraintes hydrauliques de la couche.

Une fois les 5 plus grosses particules prélevées, il faut prendre, au hasard, environ 1,4 kg de matériaux de cette couche pour les faire sécher à l'étuve puis ne conserver qu'un kilogramme. Selon Church et al. (1987), pour qu'un échantillon soit représentatif, il faut que la masse du plus gros grain soit inférieur à 1% de la masse totale de l'échantillon, avec un  $D_{max}$ , dans notre cas, égal à 90 mm. Favario (2012) a calculé qu'un kilogramme de matériaux suffisait à remplir ce critère pour le torrent du Moulin. Après séchage à l'étuve, il ne reste que légèrement plus qu'un kilogramme. Les derniers dizaines de grammes sont retirés afin d'arriver au kilogramme.

Le tamisage peut désormais être effectué grâce à l'emboîtement de tamis de taille choisie. Le tamisage se fait par voie humide, l'eau étant nécessaire pour séparer les particules colmatées par des matériaux fins. Cette méthode est beaucoup moins agressive. Cependant, il faut veiller à laisser refroidir les matériaux après le séchage à l'étuve afin de ne pas fragiliser les particules avec l'eau froide. De plus, les fines traversent difficilement le dernier tamis et il est donc nécessaire de le tamiser, de temps en temps, avant de reprendre ceux du dessus.

Les matériaux de chaque tamis sont récupérés, séchés et pesés afin d'obtenir la proportion de chaque classe granulométrique. Les particules traversant le dernier tamis correspondent aux limons. Comme indiqué dans la partie **3.1.**, les matériaux de taille supérieure à 8 mm sont passés individuellement dans un gabarit granulométrique

## **4. TRAITEMENT DES DONNEES**

### **4.1. DONNEES DE TRAPPE**

Depuis l'installation de la trappe en septembre 2011, 27 crues ont été mesurées pour 19 remplissages de la trappe à fente. La répartition saisonnière est la suivante : 12 crues en automne, 9 au printemps, 6 en été et une en hiver. Tous les relevés ont été réalisés de manière identique, que ce soit sur le terrain, en laboratoire ou en traitement Excel. Depuis le 09 juillet 2013 des ailettes ont été installées pour ne mesurer qu'un flux solide entrant dans la taille d'admission (Fig. 18).

Aussi, ces ailettes peuvent bloquer des cailloux et empêcher une entrée correcte des sédiments. L'ouverture a donc été élargie pour passer à 8 cm. Depuis, ce phénomène d'obstruction n'a plus été constaté.



Figure 18: Ailettes installées sur la trappe à fente

#### 4.1.1. RECHERCHE DE L'ÉVÉNEMENT

Le différentiel de pression est le premier graphique à réaliser. Ce différentiel indiquant le moment où les sédiments tombent dans la trappe (Fig. 19), il pourra montrer graphiquement le moment où l'initiation du mouvement des particules se fait au droit de la trappe.

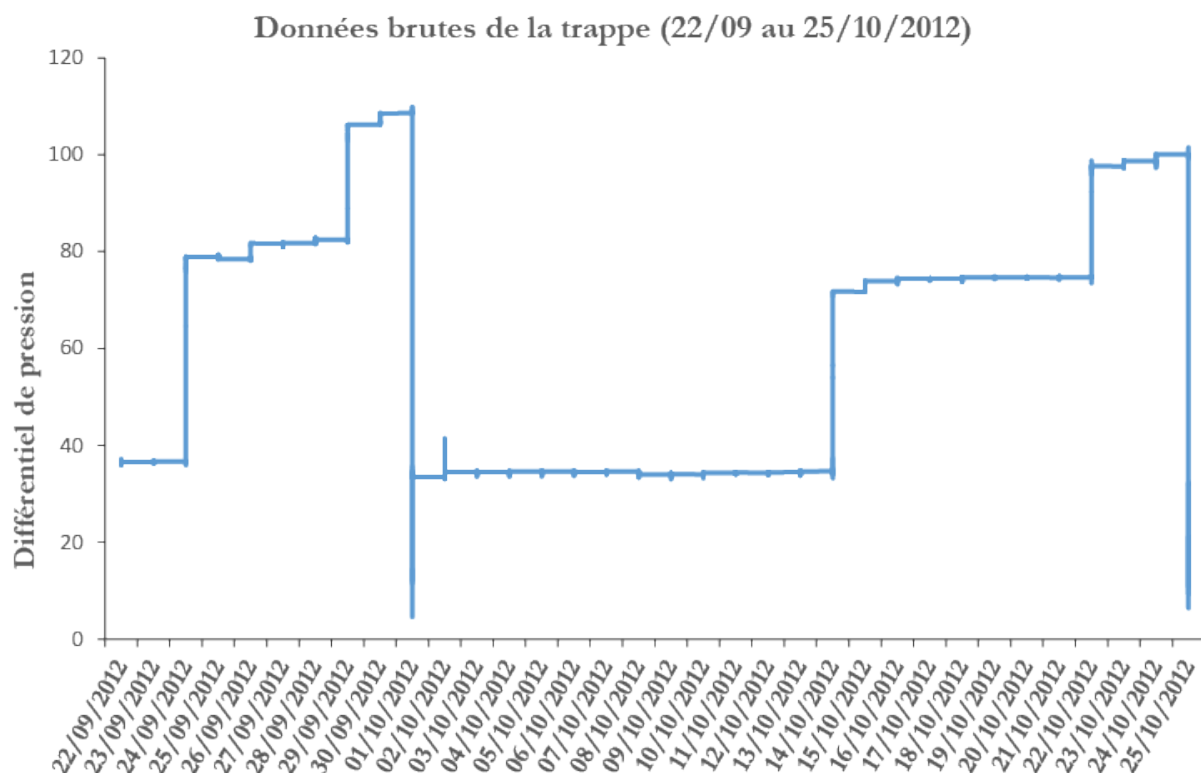


Figure 19: Représentation graphique du remplissage de la trappe lors de la période du 22/09 au 25/10/2012



Dans la figure 19, nous repérons que les remplissages ont eu lieu le 24/09/2012 et le 29/09/2012 (2 crues pour un relevé, avec vidange le 01/10/2012) ainsi que le 14/10/2012 et le 22/10/2012 (2 crues avec une vidange le 25/10/2012). Une fois la période repérée, l'échelle graphique peut être modifiée en conséquence pour obtenir une précision quant aux horaires. Une fois celle-ci délimitée, les hauteurs d'eau et les débits transmis par l'équipe de Draix sont rajoutés dans les colonnes adjacentes.

#### 4.1.2. TRAITEMENT DE L'EVENEMENT

Afin de faciliter les futurs traitements, deux étapes sont à réaliser : faire une première feuille Excel de « synthèse » (Annexe 1) avec des valeurs fixes rentrant dans les formules (densité apparente, densité des marnes, pente du chenal etc.) et conserver seulement des valeurs toutes les minutes. À noter que certaines valeurs de la feuille de synthèse se mettent à jour après avoir rempli d'autres feuilles Excel. Il faut simplement veiller à respecter le même ordre dans les feuilles et les colonnes pour une bonne gestion et automatisation des fichiers de relevé de trappe (Annexe 2). Cette feuille de synthèse est importante puisqu'elle simplifie les formules des autres feuilles d'un fichier de relevé et permet de résumer les informations importantes de la crue sur une unique feuille.

Par la suite, il est nécessaire de vérifier nos données hydrauliques en calculant la hauteur d'eau au droit de la trappe grâce au capteur. Le capteur de pression étant situé de manière fixe à 92,5cm sous le lit, il suffit de soustraire la valeur de mesure de hauteur d'eau (Figure 13, colonne D) par 92,5. Toujours avec les capteurs de pressions de la trappe à fente il est possible, comme expliqué précédemment, de savoir si oui ou non il y'a eu entrée de sédiments. Si la valeur du différentiel est supérieure de plus de 5% à la valeur précédente, alors il y'a charriage et remplissage de la trappe.

Une fois déterminé qu'il y'a entrée de sédiment, l'objectif est de quantifier celle-ci. Cette quantification se fait de deux manières, une avec la masse cumulée submergée et la suivante avec la masse déjàugée. Avec la masse de sédiments toutes les minutes, il est possible de déterminer le flux de sédiments charriés en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ .

En complément des hauteurs d'eau et de débits il est possible de calculer la contrainte de cisaillement, soit la force tractrice, notée  $\tau$ . Cette notion a été mise en évidence en 1879 par Du Boys avec l'équation suivante :

$$\tau = \rho g R_h S$$

avec  $\rho$  la masse volumique du fluide (en  $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  l'accélération de la gravité ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ),  $R_h$  le rayon hydraulique et  $S$  la pente (en  $\text{m/m}$ ).

L'équation de Du Boys exprime la tension tangentielle du poids de l'eau et les forces de résistance du lit. Cette équation est normalement limitée aux écoulements uniformes et constants (Powell et al., 2001). Cependant, celle-ci peut s'appliquer même si l'écoulement n'est pas uniforme et constant si (1) les mesures de la pente de la ligne d'eau sont faites sur une distance dans le sens de l'écoulement plus longue que la largeur de divagation possible de l'écoulement, et si (2) la variation dans le temps de l'écoulement est faible et qu'elle n'impact pas sur l'équilibre des forces (Paola and Mohrig, 1996).

Il est important de souligner que les valeurs de  $\tau$  sont des valeurs moyennes qui pour un débit donné s'exercent sur l'ensemble d'un profil transversal (Bravard and Petit, 1997).

## **4.2. DONNEES GRANULOMETRIQUES**

Après chaque événement, les données granulométriques issues du tamisage sont reportées dans un fichier spécifique (Annexe 3) et une feuille de synthèse est automatiquement mise à jour (Annexe 4 et 5). Les données concernant la taille des particules par déciles (D10, D16, D25, D50, D75, D84 et D90), le diamètre moyen et maximum des 5 plus grosses particules, ainsi que le pourcentage de chaque fraction granulométrique sont copiées dans une feuille du fichier du relevé de trappe et ce par tranche de 10 cm. Il est ainsi possible de les associer à un pas de temps pour mettre en relation tous les paramètres précédemment exposés avec la granulométrie dans la trappe (Annexe 6) grâce au produit de la hauteur de la couche et de la surface de la trappe avec la densité des marnes.



## TROISIEME PARTIE : RESULTATS

---

1. GRAPHIQUES PAR EVENEMENTS
2. FLUX CHARRIE EN FONCTION DES CONTRAINTES HYDRAULIQUES
3. ÉVOLUTION DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUE
4. ÉVOLUTION GRANULOMETRIQUE EN FONCTION DE LA FORCE TRACTRICE

# RESULTATS

## 1. GRAPHIQUES PAR EVENEMENTS

La méthodologie appliquée pour traiter les données brutes de chaque événement étant strictement identique, les mêmes graphiques seront disponibles pour chaque crue. Ceux-ci ont deux principales fonctions : vérifier la justesse des mesures et créer des relations entre diverses données. L'exemple utilisé dans cette partie sera l'événement du 25 août 2012.

### 1.1. REMPLISSAGE DE LA TRAPPE

Ce graphique de remplissage est le premier à analyser puisqu'il permet de voir la temporalité du dépôt des sédiments dans le fond de la trappe. Sur le même graphique est ajouté la hauteur d'eau au droit de la trappe afin d'obtenir un visuel sur les périodes où la hauteur d'eau était suffisante pour mobiliser les sédiments et donc remplir la trappe. Dans le cas où pour une même hauteur d'eau il n'y a plus d'entrée de sédiments dans la trappe, plusieurs scénarios existent. Soit la trappe est pleine, ce que l'on peut savoir avec les données puisque la valeur de masse maximale est connue (environ 450 kg), soit l'entrée est obstruée par une plaquette ou un bloc, soit le transport se fait par bouffées si la contrainte de cisaillement est proche de la valeur critique de mise en mouvement.

Dans notre exemple (Fig. 20) un premier pic de crue est visible à 16h12 et la courbe du remplissage de la trappe se cale bien avec celle de la hauteur d'eau.

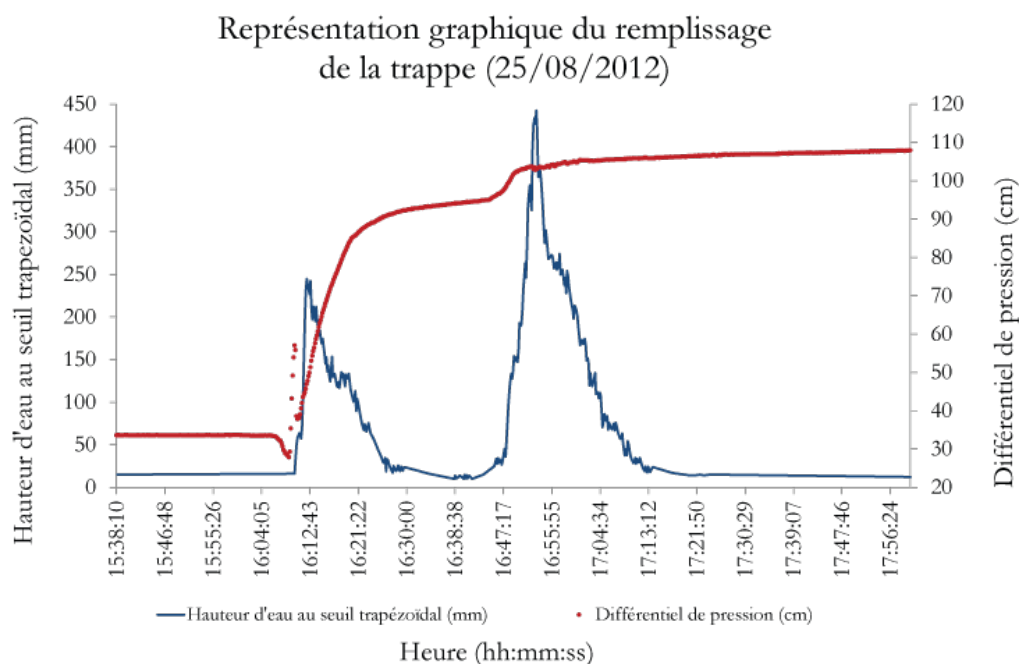


Figure 20: Représentation graphique du remplissage de la trappe lors de l'événement du 25 Août 2012

Lorsque la hauteur d'eau n'est plus suffisante, la courbe du remplissage s'aplanit. Lors du deuxième pic de crue, de même intensité que le premier, le remplissage se fait sur une courte période avant de stabiliser autour de la valeur de 430 kg à 16h50. La trappe est donc pleine et la fin de la crue, deuxième pic compris, n'est plus mesurable en termes de transport solide.

## 1.2. RELATION ENTRE LA HAUTEUR D'EAU ET LE FLUX CHARRIÉ

De manière similaire au graphique précédent, la courbe de la hauteur d'eau peut être associée à celle du flux solide (Fig. 21). Sur le principe, l'intérêt est le même que précédemment puisque le flux solide correspond à un calcul se basant sur la mesure d'entrée de sédiments. Cependant, l'analyse visuelle comparative permet d'obtenir une représentation simple de l'événement. Les deux courbes se calquent très bien, la relation est presque parfaite. Cependant, les deux seuls moments où les courbes ne sont plus similaires nous intéressent. À 16h32 la hauteur d'eau n'est plus suffisante pour qu'il y ait une mobilisation des particules. Lors de la deuxième crue, à partir de 16h45 les deux courbes réagissent ensemble avant que celle du transport solide chute à 16h49 pendant que l'autre continue de croître. Comme vu précédemment il s'agit de l'instant où la trappe est pleine. On pourrait facilement extrapoler la valeur de flux solide, au second pic de crue, qui aurait dû être plus importante que la première, aux alentours de 2 ou 2,5  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ .

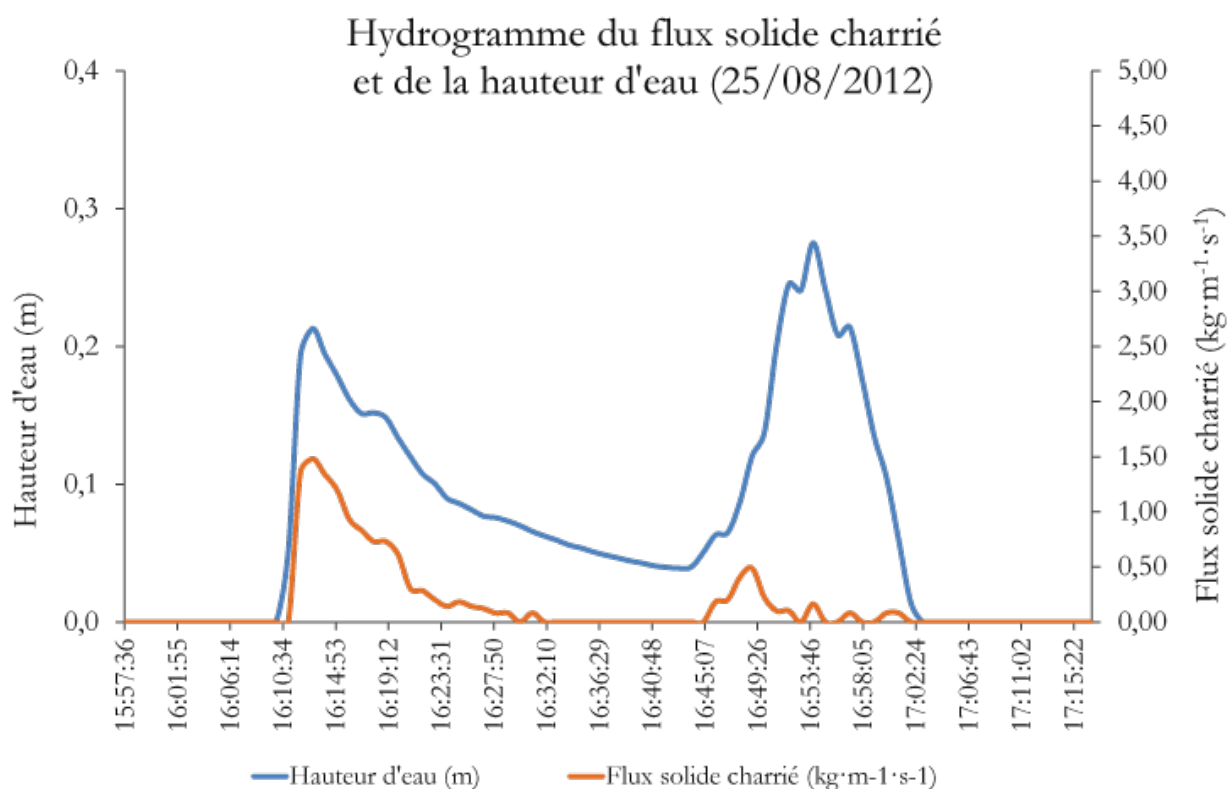


Figure 21: Représentation graphique de la hauteur d'eau et du flux solide charrié lors de l'événement du 25 Août 2012

### 1.3. RELATION ENTRE LA FORCE TRACTRICE ET LE FLUX CHARRIÉ

Nous cherchons à démontrer les influences des contraintes hydrauliques sur le charriage. Une augmentation de la force tractrice, ou contrainte de cisaillement (contrainte tangentielle sur une surface), devrait, selon la littérature, entraîner une mobilisation plus importante de matériaux. Qu'en est-il pour cet événement, représentant une large plage de contraintes de cisaillement ? Sur la figure 22, nous pouvons observer une forte corrélation positive entre les deux variables, avec un  $R^2$  de 0,88. Lorsque la force tractrice augmente, le flux charrié est plus important.

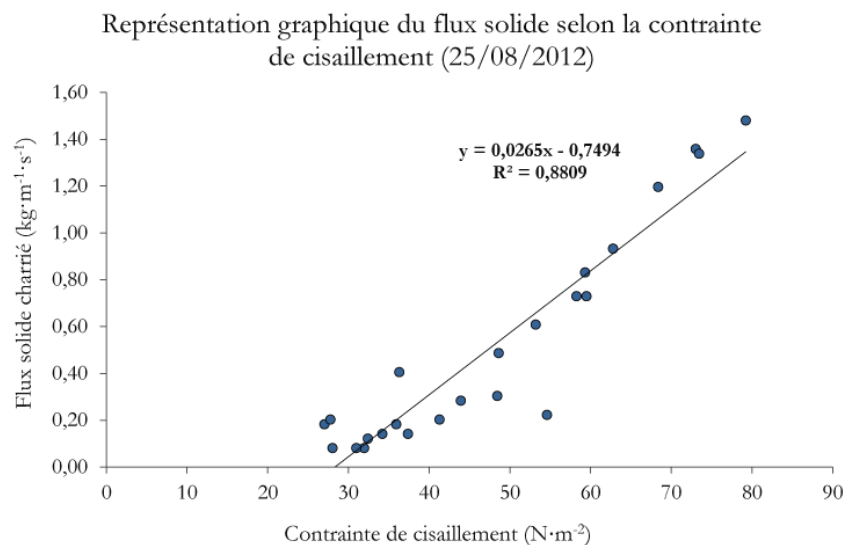


Figure 22: Représentation graphique du flux solide selon la contrainte de cisaillement, événement du 25 Août 2012

Cependant, cette relation n'est pas toujours aussi nette. Le remplissage s'est fait, pour cet événement, en 38 minutes. Il arrive que l'intensité de certains événements soit à la limite de mise en mouvement des particules, appelé contrainte critique. Dans ce cas, les particules sont mises en mouvement, mais de façon très faible ou très irrégulière. L'événement peut alors durer plusieurs heures et le remplissage complexe à mettre en relation dû à l'irrégularité du transport.

### 1.4. ÉVOLUTION GRANULOMETRIQUE

La force tractrice influe sur le charriage, mais qu'en est-il de la granulométrie de celui-ci ? La littérature nous dit que plus la contrainte de cisaillement est forte, plus gros seront les matériaux transportés. Pouvons-nous vérifier cela à l'échelle de cet événement ?

Le D50, soit le diamètre médian des particules, est couramment utilisé. Il représente la valeur pour laquelle la moitié des particules sont de taille plus importante et l'autre moitié de taille moins importante. La figure 23 représente l'évolution de la taille du D50 en fonction de la contrainte de cisaillement. Les huit points correspondent à huit couches de 10 à 90cm, la première

couche (0 à 10cm) ne comportant pas de données utilisables. Alors que pour une contrainte de 30  $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$  le D50 est de 1mm, celui-ci augmente jusqu'à 5,31mm pour une contrainte de 76  $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ .

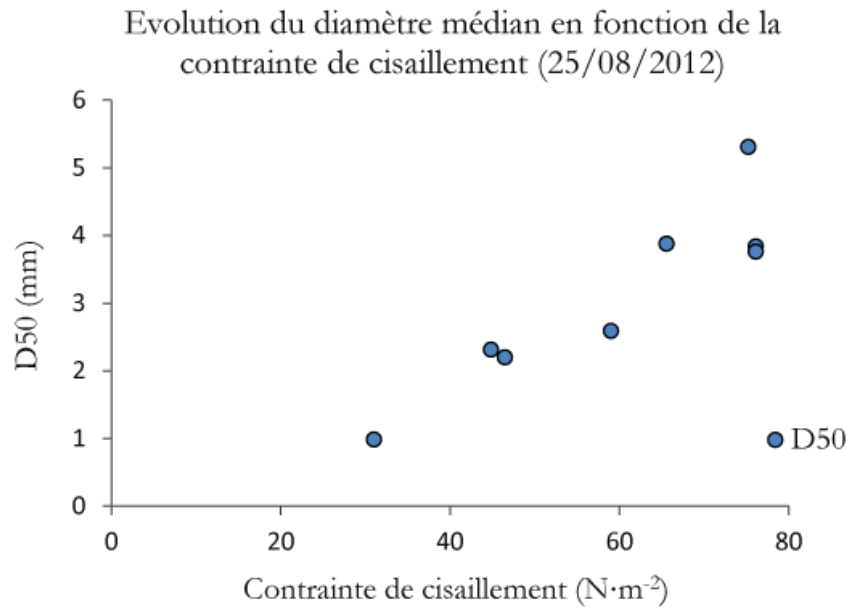


Figure 23: Évolution du D50 avec l'augmentation de la contrainte de cisaillement, événement du 25 Août 2012

Le même graphique a été réalisé pour le D90 (Fig. 24). Il s'agit cette fois de la valeur pour laquelle 10% des particules sont plus grandes et 90% sont plus petites. La différence est cette fois moins flagrante, mais une corrélation positive est tout de même notable. Pour une contrainte de 30  $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$  le D90 est de 8,8mm, celui-ci augmente jusqu'à 24,04mm pour une contrainte de 76  $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ .

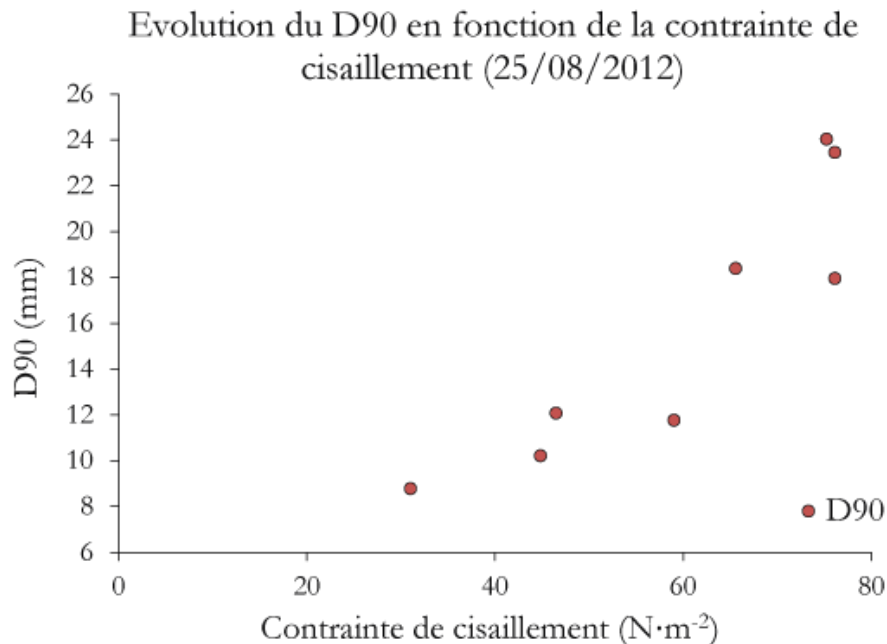


Figure 24: Évolution du D90 avec l'augmentation de la contrainte de cisaillement, événement du 25 Août 2012



Ces graphiques montrent bien une corrélation positive entre la force de l'écoulement et la taille des grains charriés.

## 2. FLUX CHARRIE EN FONCTION DES CONTRAINTES HYDRAULIQUES

Le questionnement principal entourant ce manuscrit est l'évolution du charriage et de sa granulométrie en fonction des contraintes hydrauliques, et ce pour tous les événements. Avant de chercher à comprendre les conséquences de ces contraintes sur la granulométrie, il semble intéressant de voir comment le flux solide réagit face à l'évolution de cette force tractrice que ce soit de manière générale, selon la saison ou selon des phases érosives ou de dépôt.

### 2.1. FLUX SOLIDE SELON LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT

Dans quelle proportion la contrainte de cisaillement va-t-elle influencer le flux solide ? Avec tous les événements depuis la mise en place de la trappe à fente, il est possible d'avoir une vision représentative grâce à un large panel d'échantillons (Fig. 25). Il faut noter que la borne supérieure de nos valeurs de contrainte de cisaillement est 65 fois plus grande que la borne inférieure (de 3,55 à 231,44) et 350 fois plus grande pour le flux solide (de 0,07 à 26,37). En réalisant le graphique avec tous les événements une corrélation positive se démarque. Plus la contrainte de cisaillement va être forte, plus la quantité de matériaux transportée par charriage va être importante.

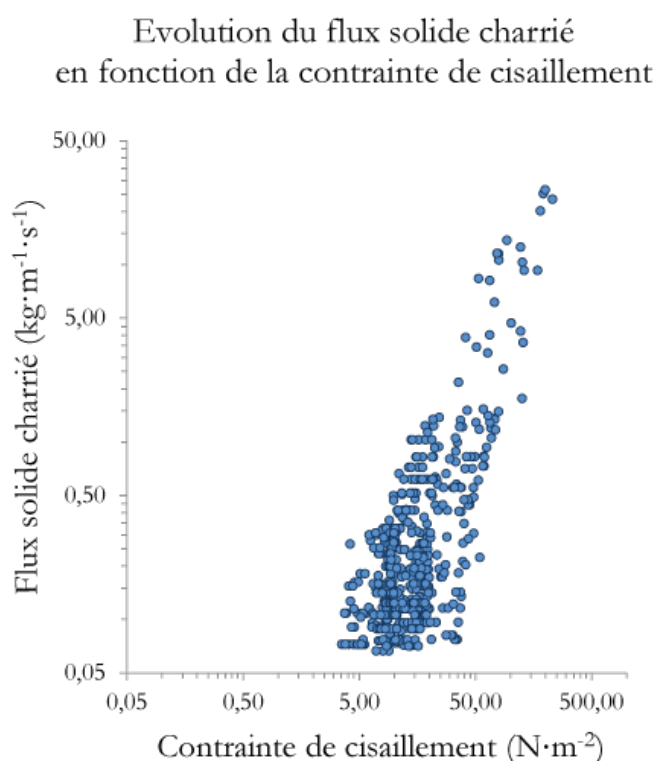


Figure 25: Évolution du flux solide charrié en fonction de la contrainte de cisaillement (Liébault, 8ème Conférence Internationale de Géomorphologie IAG - Paris 2013)

Mais nous pouvons aussi noter qu'il peut y avoir une grande variabilité entre les valeurs de flux solide et ce pour une même contrainte de cisaillement. Pour une contrainte de cisaillement de  $35 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ , les valeurs de flux solide varient de  $0,08$  à  $2,17 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ . Comment expliquer une telle variabilité ? Pratiquement toutes les études de terrain montrent que le phénomène de charriage est très fluctuant dans l'espace et dans le temps et que l'amplitude des fluctuations diminue quand l'intensité du transport augmente (Recking et al., 2013) ce qui est visible ici. L'origine de ces fluctuations, dans notre cas, est principalement imputable aux conditions du lit et à la granulométrie de celui-ci. Il s'agit donc de variabilité naturelle.

## 2.2. COMPORTEMENT SAISONNIER ET RESPIRATION DU LIT

Comme expliqué lors de la présentation du site du Moulin, la spécificité de ce torrent est l'importance de la respiration du lit. Le lit peut passer de plusieurs dizaines de centimètres de sédiments à une roche-mère visible et ce en seulement quelques événements. Ce comportement saisonnier va fortement influencer le transport solide, comme le montre la figure 26. Les courbes de tendance sont similaires avec un coefficient de détermination identique. Elles sont simplement décalées sur l'axe des abscisses, c'est-à-dire qu'il faudra une contrainte de cisaillement plus élevée en printemps et en été pour obtenir un charriage identique à un événement d'automne ou d'hiver. La fluctuation que nous avons précédemment démontrée est ici atténuée si nous séparons les événements en deux saisons. Une partie de la forte fluctuation provient donc du comportement saisonnier du torrent.

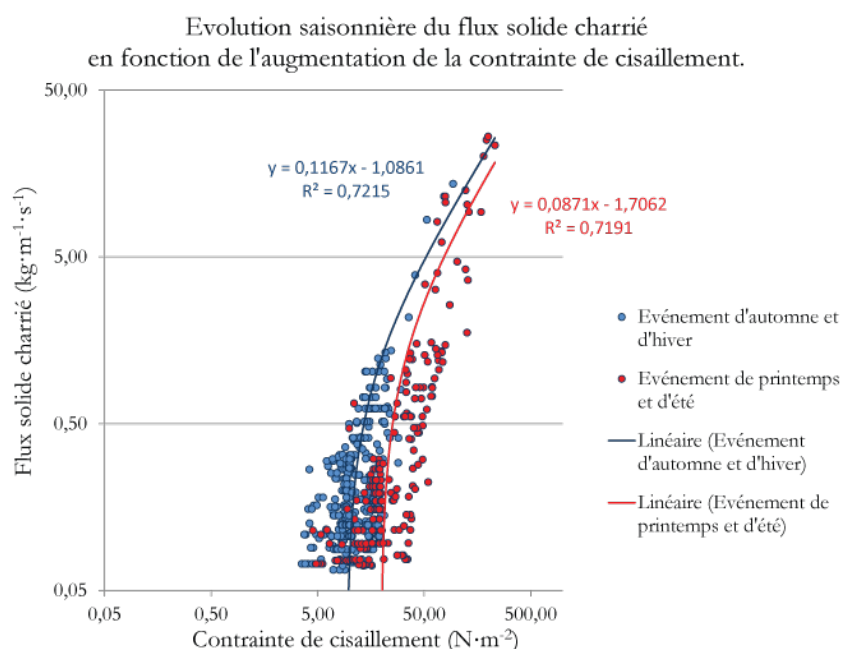


Figure 26: Évolution du flux solide charrié en fonction de la contrainte de cisaillement. Mise en forme saisonnière (Liébault, 8ème Conférence Internationale de Géomorphologie IAG - Paris 2013)

Ce comportement saisonnier est aussi valable pour les phases d'érosion ou de dépôt (Fig. 27) puisque les événements où le bilan des chaînes d'érosion est positif (dépôt) correspondent aux événements d'été de la figure 26.

Evolution du flux solide charrié en fonction de la contrainte de cisaillement  
Différentiation selon le bilan sédimentaire

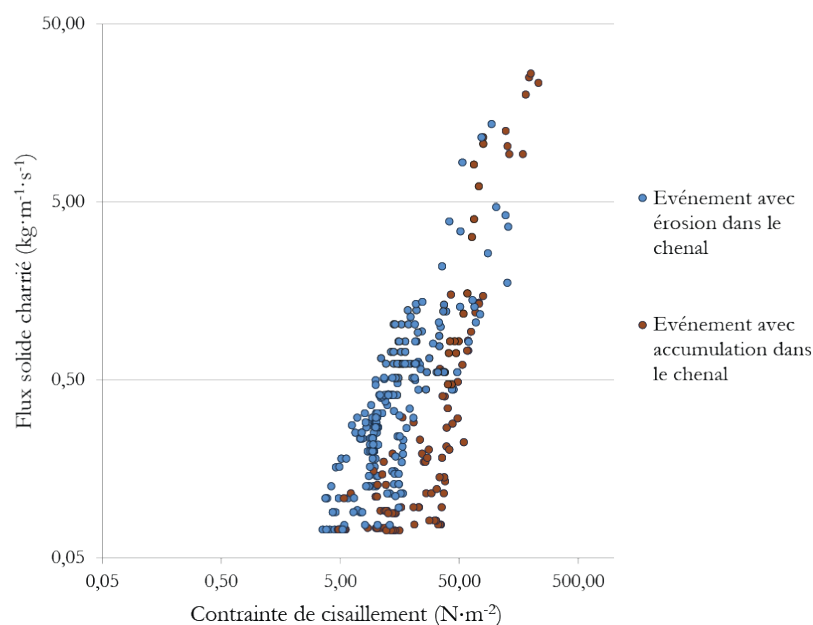


Figure 27: Évolution du flux solide charrié en fonction de la contrainte de cisaillement. Mise en forme selon le bilan sédimentaire (Liébault, 8ème Conférence Internationale de Géomorphologie IAG - Paris 2013)

Les phases d'érosion ou de dépôt ne sont pas conditionnées par la force tractrice mais par le stock sédimentaire mobilisable. Ce stock peut être mobilisé dans le chenal (ce que nous pouvons voir grâce aux chaînes d'érosion) ou sur les versants avec un transfert direct du versant à l'exutoire, sans stockage dans le lit.

### 2.3. COMPARAISON SELON LA LARGEUR D'ÉCHANTILLONNAGE

Comme indiqué dans la partie « Méthodologie », depuis le 09 Juillet 2013 des ailettes ont été disposées de part et d'autre de la fente pour ne mesurer que le charriage entrant dans la largeur d'échantillonnage. Ces ailettes ont été biseautées et la largeur a été modifiée de 4 à 8cm pour éviter que les plus gros matériaux puissent obstruer l'entrée de la fente. Mais des conséquences de cette modification sont-elles visibles, un an après leur installation?

Sur la figure 28, nous pouvons noter que le positionnement des deux séries de points est similaire entre les événements à 4 cm et ceux à 8cm. Il n'y a aucun point qui sort de ce regroupement.

Evolution du flux solide charrié en fonction de la contrainte de cisaillement.  
Différentiation selon les événements mesurés à 4 et 8 cm d'ouverture

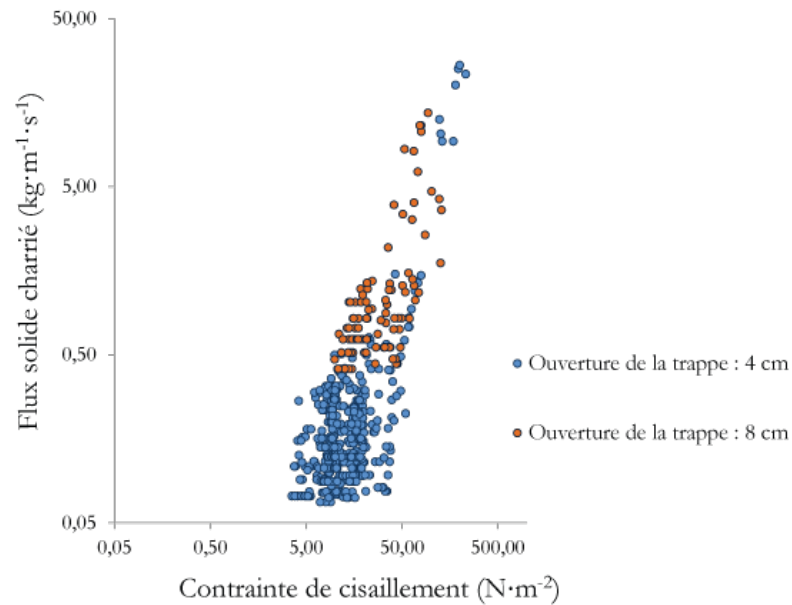


Figure 28: Évolution du flux solide charrié en fonction de la contrainte de cisaillement. Mise en forme selon l'ouverture de la trappe

De plus, la saisonnalité est toujours visible entre les deux différentes mesures (Fig. 29). Les anciennes mesures, comme les nouvelles semblent donc amener des résultats similaires et la modification de la largeur d'échantillonnage ne semble pas créer de modifications dans les mesures.

Evolution saisonnière du flux solide charrié en fonction de la contrainte de cisaillement. Différentiation selon les événements mesurés à 4 et 8 cm d'ouverture

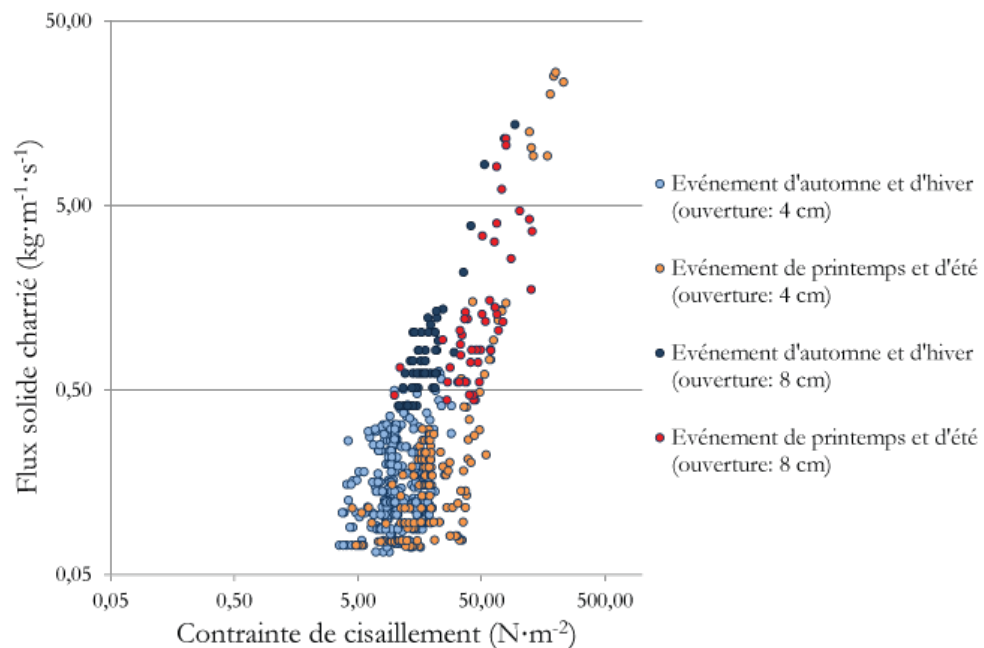


Figure 29: Évolution du flux solide charrié en fonction de la contrainte de cisaillement. Mise en forme selon l'ouverture de la trappe et la saison

Le seul questionnement que nous pouvons désormais nous poser est l'impact au niveau des faibles écoulements. Nous n'avons pour le moment aucun événement avec une contrainte de cisaillement inférieure à 12, il convient donc d'attendre d'avoir des résultats pour de faibles événements pour une conclusion définitive.

### **3. ÉVOLUTION GRANULOMETRIQUE EN FONCTION DE LA FORCE TRACTRICE**

#### **3.1. ÉVOLUTION GRANULOMETRIQUE SELON LE TAUX DE TRANSPORT**

Avant de voir comment réagissent les fractions granulométriques constituées grâce au tamisage, il semble intéressant de regarder la granulométrie générale. Pour cela, les données concernant le D50 et le D90 seront analysées. L'utilisation du D50, le diamètre médian, permet une représentation graphique simple de la granulométrie de la couche. Sur l'axe des abscisses nous avons le taux de transport. Le taux de transport est noté  $\tau/\tau_c$ , soit la contrainte de cisaillement sur la contrainte de cisaillement critique de mise en mouvement des particules. Le taux résultant de ce calcul est ensuite arrondi à l'entier le plus proche afin de regrouper et de moyenniser plusieurs couches ayant des contraintes hydrauliques similaires. Ce dernier permet aussi de comparer plus facilement les sites d'études entre eux puisque la valeur de contrainte de cisaillement critique est propre à chaque torrent. En mettant en relation le diamètre médian avec le taux de transport, les résultats confirment-ils nos précédentes analyses ?

La figure 30, représente le D50 moyen des événements pour un taux de transport donné. Cette figure suit la logique des précédents graphiques. Plus le taux de transport est élevé, plus les grains charriés sont grossiers.

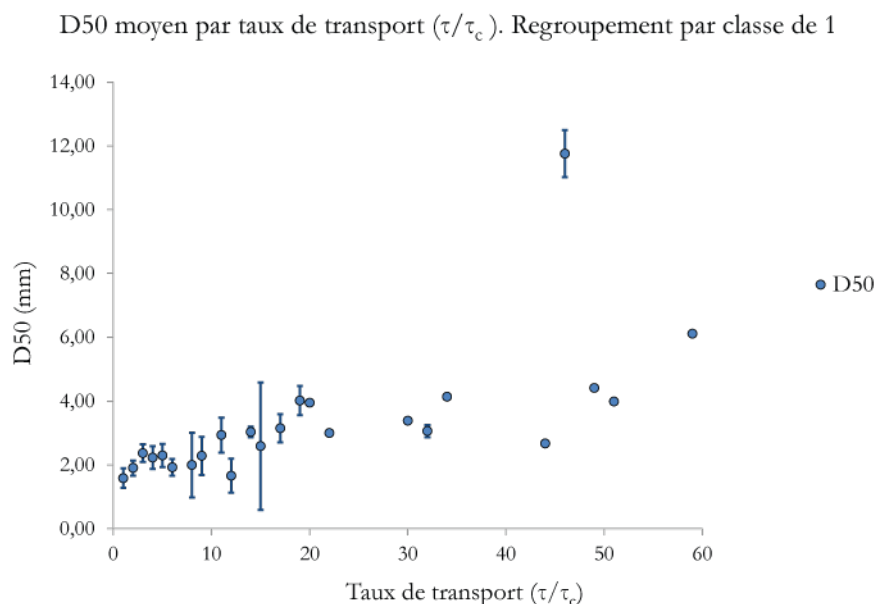


Figure 30: Représentation du D50 moyen des événements pour un taux de transport donné. Les taux de transport ont été arrondis à l'entier le plus proche

Le D50 des particules charriées à taux de transport minimal est 3 fois inférieur au D50 lors des taux de transport les plus importants, passant de 1,8mm à 6mm. La granulométrie est de plus en plus grossière en fonction de l'augmentation des contraintes hydrauliques.

Le D90 est aussi couramment utilisé. Dans notre cas (Fig. 31), il conforte les précédents résultats puisque pour un taux de transport minimal, les 10% de particules les plus grosses sont supérieures à 6mm, contre 20 à 30mm pour les plus fort taux de transport. La taille des particules charriées les plus grossières est directement liée aux contraintes hydrauliques.

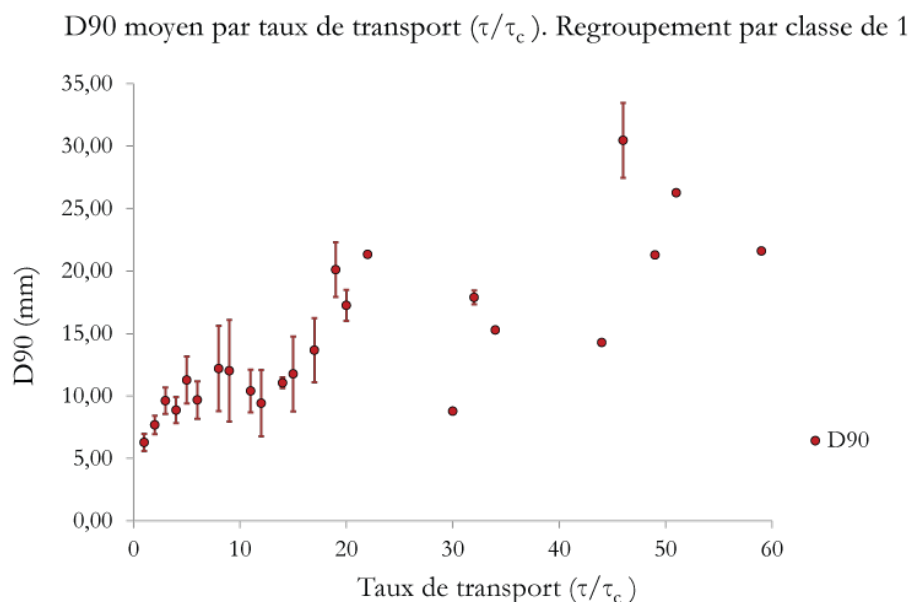


Figure 31: Représentation du D90 moyen des événements pour un taux de transport donné. Les taux de transport ont été arrondis à l'entier le plus proche

Ces affirmations peuvent être complétées en prenant la taille moyenne des 5 particules les plus grosses de chaque couche (Fig. 32).

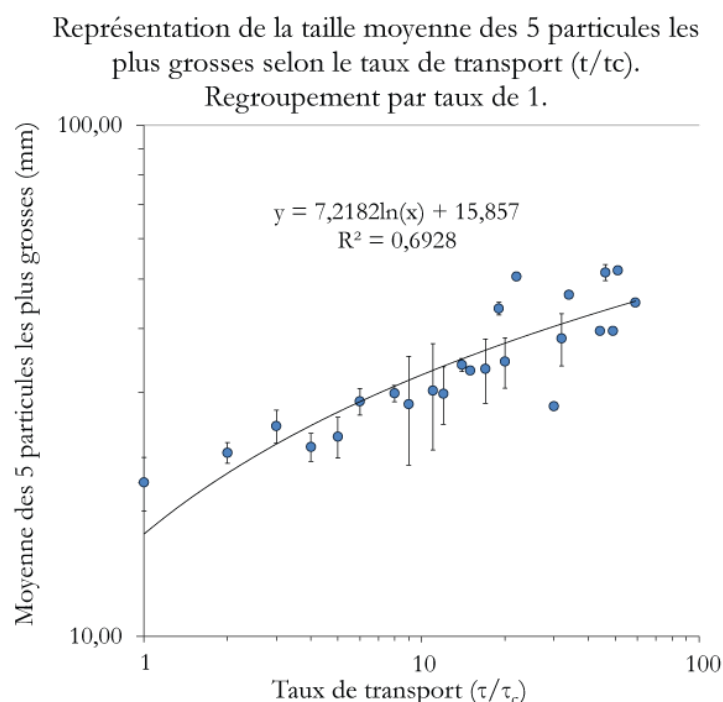


Figure 32: Représentation de la taille moyenne des 5 particules les plus grosses pour un taux de transport donné. Les taux de transport ont été arrondis à l'entier le plus proche

Une échelle logarithmique a été appliquée afin de faciliter la lecture du graphique. À la manière des précédents résultats, une corrélation est visible entre la taille moyenne des particules les plus grosses et le taux de transport, avec un  $R^2$  significatif de 0,69. La taille moyenne des particules les plus grosses varie de 20 ( $\tau/\tau_c = 1$ ) à 45 ( $\tau/\tau_c = 59$ ). Plus le taux de transport est élevé plus les 5 particules les plus grosses qu'on mesure à chaque couche seront de taille importante.

### 3.2. ÉVOLUTION DU D50 ET D90 SELON LA SAISON

Les graphiques précédents ne donnent qu'une vision globale de la variabilité granulométrique en fonction de la force tractrice. Mais de quelle manière la saisonnalité va-t-elle influencer la taille du D50 et du D90 ? Pour cela, les couches relevées pendant la période printemps/été et automne/hiver ont été séparées. La figure 33, représentant la relation entre le taux de transport et la taille du diamètre médian D50, comporte un point pour chaque taux de transport mesuré. Ce point peut comporter plusieurs couches, visualisable par les barres d'erreurs, et la moyenne du D50 et D90 des couches est alors calculée.



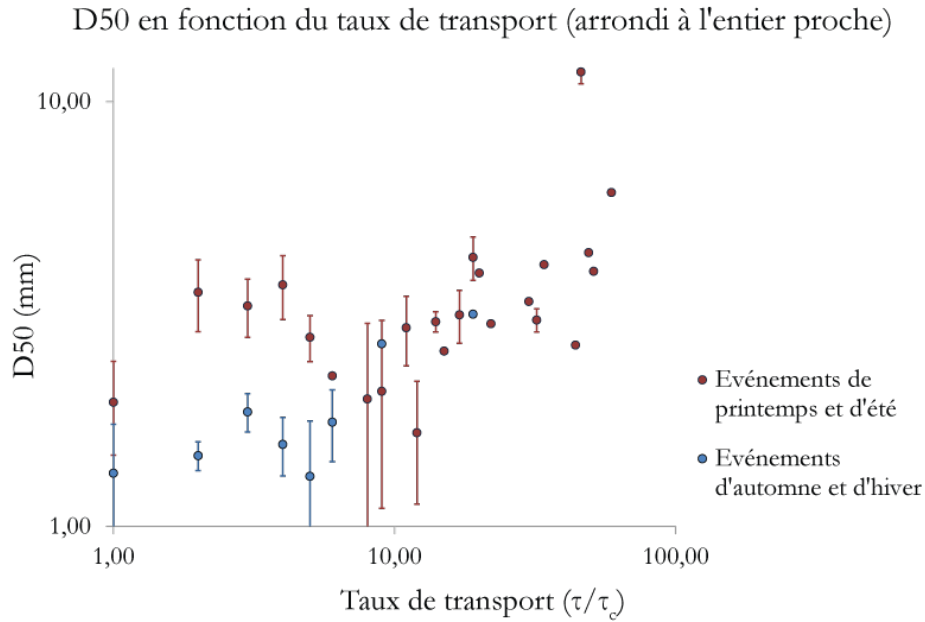


Figure 33: Représentation du D50 moyen des événements, selon la saison, pour un taux de transport donné. Les taux de transport ont été arrondis à l'entier le plus proche

Il est intéressant de voir que pour les faibles taux de transport, les points entre les événements du printemps/été et ceux d'automne/hiver sont séparés. Pour un taux de transport inférieur à 9, le D50 sera toujours plus faible lors d'un événement d'automne ou d'hiver et ce pour un taux de transport identique. Cependant, lors de taux supérieurs à 9, il semblerait que la distribution soit moins éparse et que les points se regroupent. Malheureusement il manque encore d'événements fort en automne/hiver, saison moins sensible au développement de précipitations intenses. Le constat est identique pour le D90 (Fig. 34), avec un  $\tau/\tau_c$  seuil égal à 9.

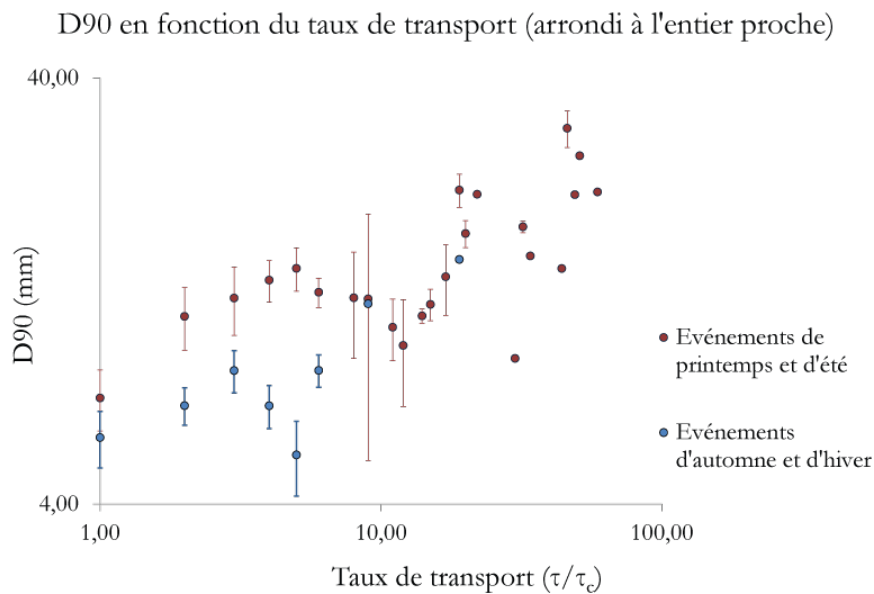


Figure 34: Représentation du D90 moyen des événements, selon la saison, pour un taux de transport donné. Les taux de transport ont été arrondis à l'entier le plus proche

Ces graphiques traduisent bien la forte variabilité naturelle du transport par charriage, que ce soit dans les faibles ou forts écoulements, avec des valeurs oscillant fortement.

La figure 35 peut permettre une meilleure compréhension du phénomène. Ce graphique ne raisonne plus en termes de couches, mais en termes d'événements. La force tractrice est représentée par la contrainte de cisaillement. La moyenne du D50, du D90, ainsi que de la force tractrice est effectuée pour toutes les couches de chaque événement.

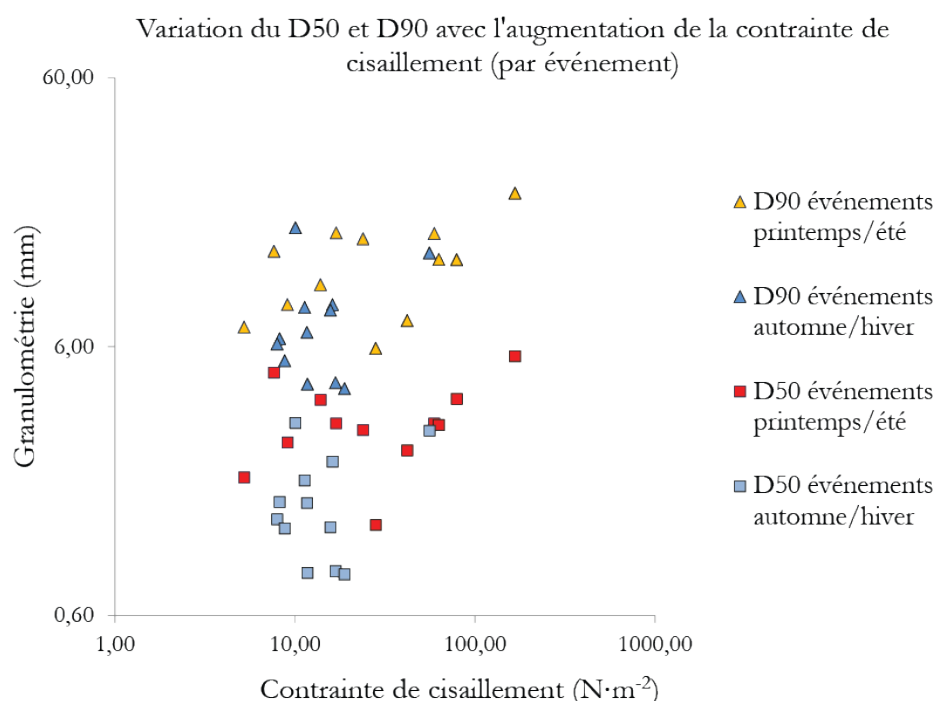


Figure 35: Évolution saisonnière du D50 et du D90 de chaque événement en fonction de la contrainte de cisaillement.

Cette figure permet une meilleure compréhension du phénomène. Comme précédemment, pour une contrainte de cisaillement similaire, mais faible, la plupart des événements d'automne ou d'hiver ont un D50 et D90 plus faible ; une grande variabilité dans la taille du D50 et D90 qui n'est plus visible pour des contraintes de cisaillement supérieures à  $40 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Comment expliquer ce phénomène ? Le comportement saisonnier du chenal semble être le facteur influant la variabilité granulométrique. Afin de faciliter la compréhension, deux photos sont nécessaires (Fig. 36 et 37).



Figure 36: Photographie du chenal en Juin 2007 (Liébault)



Figure 37: Photographie du chenal en Novembre 2007 (Liébault)

La photo du 13 Juin 2007 représente la morphologie du chenal durant la période de printemps et d'été. Comme expliqué dans la partie de présentation du site d'étude, le chenal commence à se remplir de sédiments à partir de la première crue de printemps ou d'été, et se déstocke à la première crue d'automne. Il faut donc imaginer que les forces de cohésion vont être plus fortes dans un chenal rempli, ce qui explique une contrainte plus importante nécessaire au printemps/été pour mobiliser des particules qu'en automne/hiver, comme le montre la photo du 30 Novembre 2007. Dans le cas de faibles contraintes hydrauliques, la granulométrie du charriage sera fortement dépendante de la granulométrie du chenal d'étiage et la granulométrie fortement variable entre les événements et les saisons. Au contraire, dans de forts écoulements, les matériaux de tout le chenal seront remobilisés et la variabilité dans la granulométrie sera bien plus faible entre les événements et les saisons, ce que l'on peut voir sur les graphiques précédents au-delà d'un taux de transport de 9 ou une contrainte de cisaillement de 40.

## 4. ÉVOLUTION DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES

### 4.1. ÉVOLUTION DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES SELON LA SAISON

Grace au tamisage, nous pouvons voir comment se comportent les fractions granulométriques de chaque événement (Fig. 38). Nous analysons désormais l'évolution de la granulométrie par classe de taille de particules dans le but de voir comment réagit chaque fraction granulométrique. La saisonnalité marquée sur les précédents graphiques est encore une fois visible. La proportion de fractions de matériaux fins sera plus importante pour les événements d'automne et d'hiver que ceux de printemps et d'été. Inversement, tous les événements de printemps et d'été ont une part plus importante de fractions grossières. Une des explications pourrait être que l'hiver,

la désagrégation par le gel/dégel entraîne la formation de plus grosses altérites que l'été où seul l'impact des précipitations et l'action éolienne ont une influence. Mais la principale explication concerne l'état du chenal d'étiage. Celui-ci étant dans sa phase érosive durant l'automne et l'hiver, les particules seront moins colmatées et les fractions grossières plus facile à mobiliser.

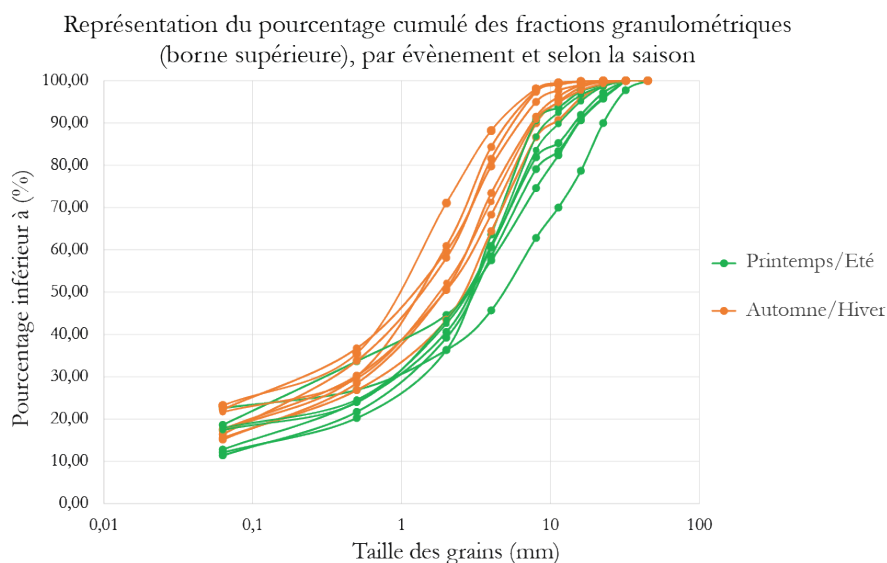


Figure 38: Représentation saisonnière du pourcentage cumulé des fractions granulométriques par événement.

À noter qu'une nouvelle fois, la différence entre les événements mesurés avec une ouverture de 4cm et ceux avec une ouverture de 8cm ne semble pas visible. Le positionnement des courbes selon la saison est similaire bien que les événements aient été mesurés avec des ouvertures différentes (Fig. 39).

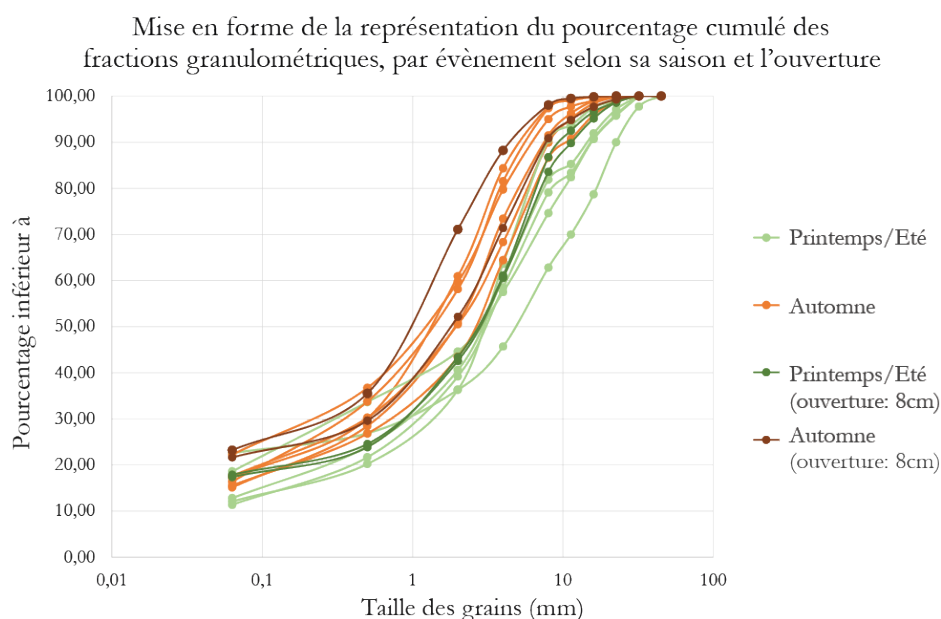


Figure 39: Représentation saisonnière du pourcentage cumulé des fractions granulométriques par événement. Distinction selon l'ouverture à 4 ou 8 cm

## 4.2. ÉVOLUTION DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES AVEC LE TAUX DE TRANSPORT

Le sujet principal de ce manuscrit est la compréhension de la granulométrie en fonction des contraintes hydrauliques. Dans quelle mesure une augmentation des contraintes hydrauliques influence-t-elle la taille des grains transportés ? Notre torrent d'étude a-t-il le même comportement au niveau du transport solide que le Nahal Eshtemoa ? Une mobilité équivalente, mise en évidence sur certains sites d'études est-elle visible ici ?

Afin de répondre à ces questions, la figure 40 représentant le pourcentage de chaque fraction granulométrique selon le taux de transport a été réalisée. La fraction granulométrique correspondant aux fines ( $<63 \mu$ ) n'a pas été prise en compte car sa variabilité naturelle nuisait à la compréhension du graphique. De manière générale, plus le taux de transport est élevé, plus la proportion de matériaux grossiers va représenter une part importante du charriage. Pour exemple, 72% des matériaux transportés par charriage à un taux de transport de 1 sont inférieurs à 4mm et 7% supérieurs à 8mm.

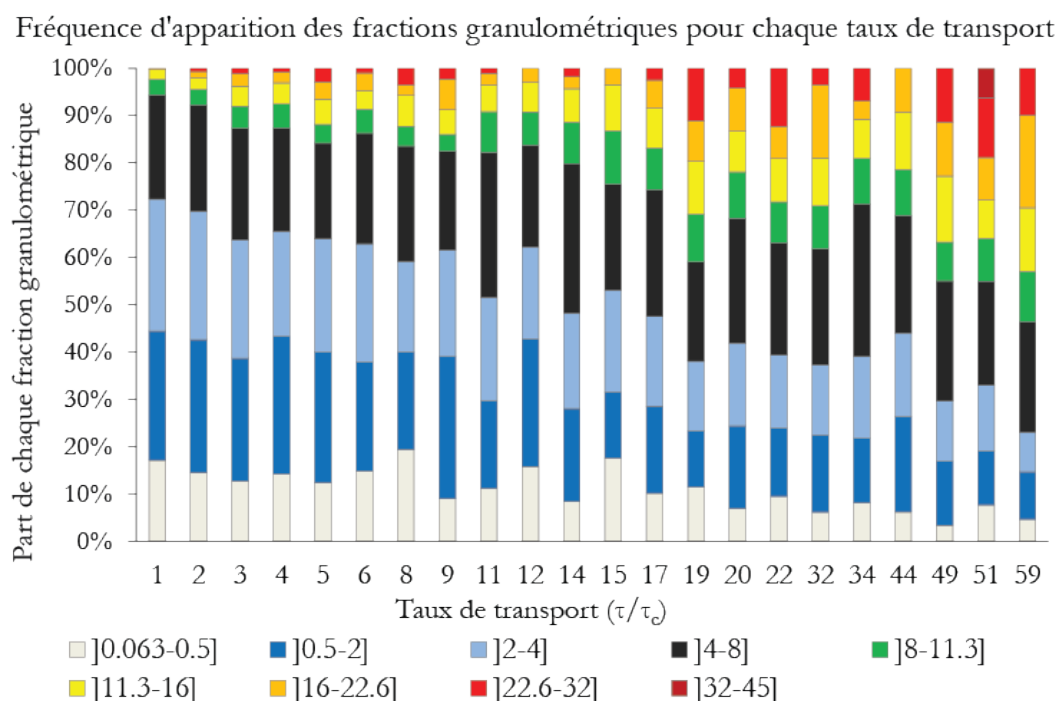


Figure 40: Représentation de la fréquence d'apparition des fractions granulométriques pour chaque taux de transport

Au contraire, pour un taux de transport maximal mesuré, les fractions inférieures à 4mm représentent 23% des matériaux charriés contre 55% pour les fractions supérieures à 8mm. En accord avec la littérature, plus les contraintes hydrauliques sont fortes, plus la part de matériaux grossiers charriés est importante. Sur les figures 40 et 41, nous pouvons remarquer une diminution

régulière de la proportion des fractions inférieures à 4mm et une augmentation pour les fractions supérieures à 8mm. Seule la fraction entre 4 et 8mm semble ne pas être impactée par l'évolution de la contrainte de cisaillement.

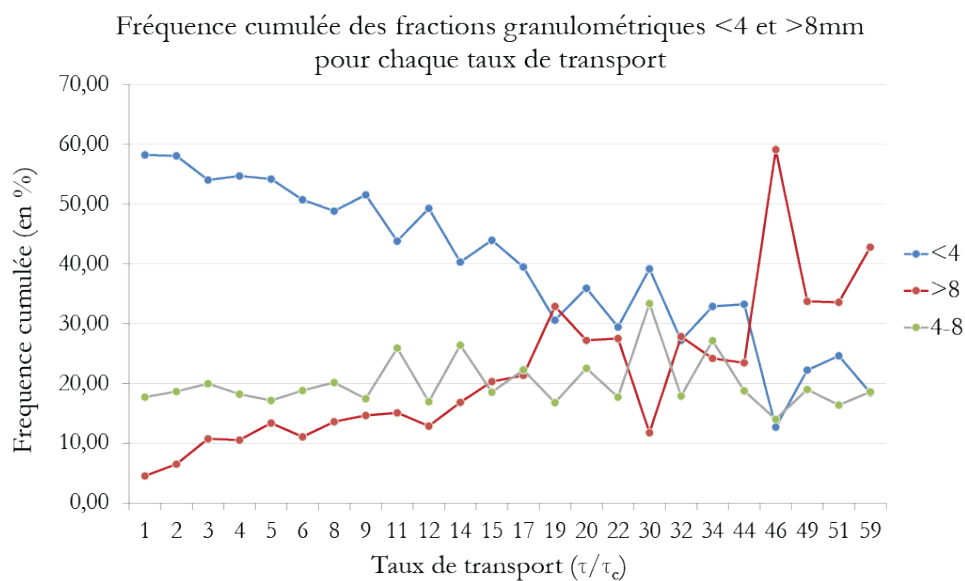


Figure 41: Représentation de la fréquence cumulée des fractions granulométriques <4 et >8 mm pour chaque taux de transport

## QUATRIEME PARTIE : DISCUSSION

---

1. COMPARAISON NAHAL ESHTEMOA ET AUTRES DONNEES
2. CONSEQUENCES DE L'OUVERTURE A 8CM ET DES AILETTES



# DISCUSSION

## 1. COMPARAISON NAHAL ESHTEMOA

Les études réalisées au Nahal Eshtemoa par Powell, Reid et Laronne (2001) ont permis d'améliorer les connaissances de l'évolution granulométrique avec l'augmentation des contraintes hydrauliques. Les données étant obtenues grâce à l'utilisation de trappe à sédiment, il est possible de comparer les résultats. La principale conclusion qui nous intéresse est que la granulométrie du charriage et des matériaux du lit est quasi équivalente à partir d'une force de cisaillement 4.5 fois supérieur à la valeur critique de mise en mouvement (Fig. 42). C'est pour cette valeur qu'ils trouvent la mobilité équivalente des plus fins aux plus grossiers. Qu'en est-il de notre site d'étude ? Une mobilité équivalente se dessine-t-elle ? Les résultats des mesures sur Draix sont visibles sur la figure 43.

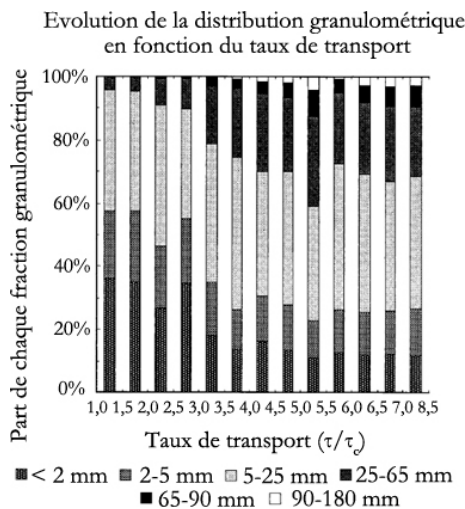


Figure 42: Évolution de la distribution granulométrique en fonction du taux de transport. Nahal Eshtemoa (Powell et al., 2001)

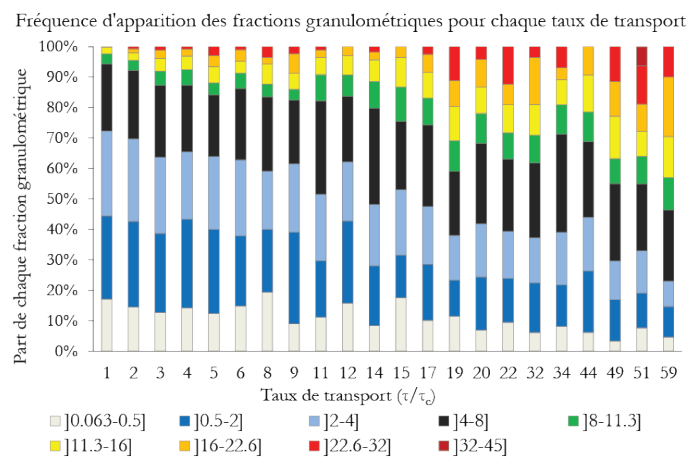
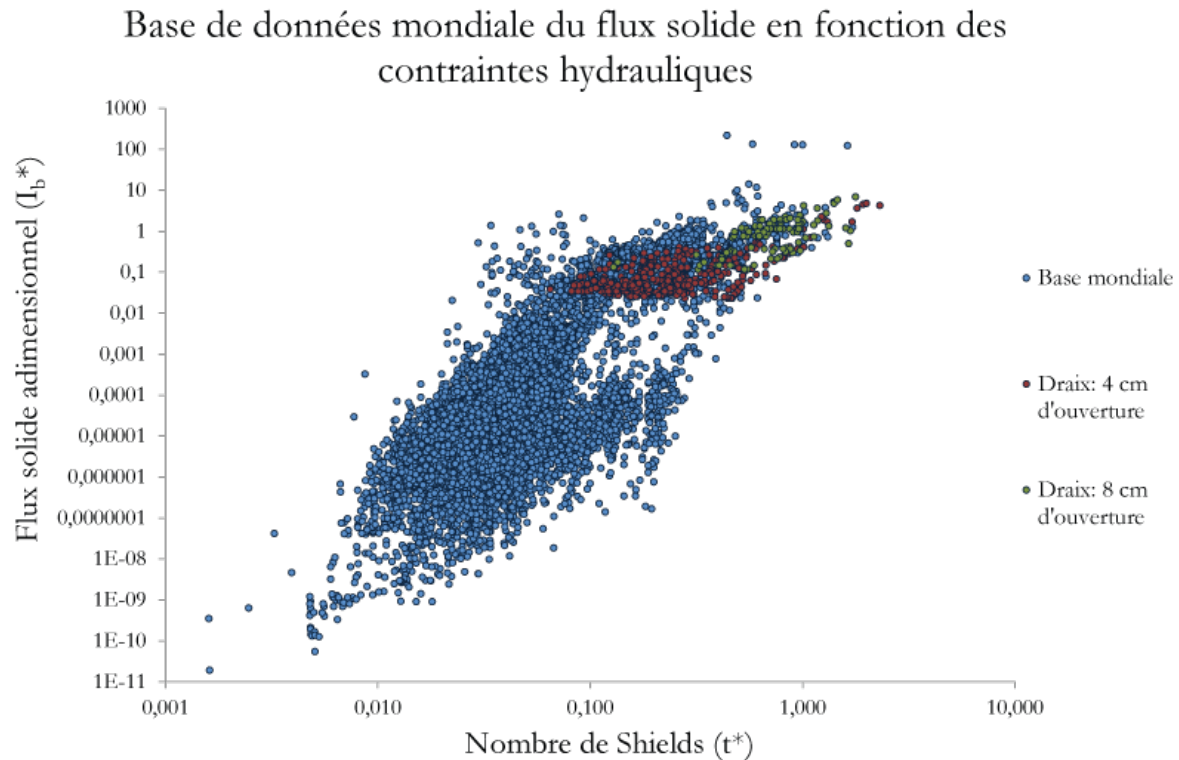


Figure 43: Représentation de la fréquence d'apparition des fractions granulométriques pour chaque taux de transport

S'ils trouvent facilement un seuil de mobilité équivalente, il n'en est pas autant pour nos résultats. Bien que nos données aient une plage bien plus importante ( $\tau/\tau_c$  maximum de 59 contre 8,5) nous n'obtenons pas de mobilité équivalente, à première vue, sur notre graphique. La part de matériaux grossiers charriés est de plus en plus importante avec l'augmentation du taux de transport. Comment expliquer que le seuil de mobilité équivalente ne soit pas visible alors que nous avons mesuré un des événements les plus forts depuis 30 ans ?

Comme visible sur la figure 44, les données acquises sur notre site d'étude sont parmi les valeurs extrêmes de la littérature. Bien que nos mesures de transport solide soit les plus élevés, notre valeur critique de mise en mouvement des particules est aussi très élevée. La mise en mouvement demande bien plus de force sur notre site d'étude et la mobilisation de tout le matelas

alluvial, ayant une force de cohésion très forte, demande des contraintes hydrauliques élevées que nous n'avons peut-être pas encore mesurées.



**Figure 44: Représentation graphique de la base de données sur les mesures du charriage dans le monde associée au nombre de Shields (Base mondiale Recking, 2013)**

Cependant, en regroupement nos données par classe de 10, sur la base de la figure 43, il semblerait que les deux dernières classes se stabilisent (Fig. 45). Les classes 40-50 et 50-60 ont des pourcentages, pour chaque fraction, strictement identique et correspondraient au seuil de mobilité équivalente. Il serait donc 10 fois plus important qu'au Nahal Eshtemoa. Il pourra être très intéressant de continuer la construction de ce graphique puisqu'il permet de supprimer la variabilité que nous avons sur la figure 43. Si tous les taux de transports mesurés sont représentés et qu'il y'a mobilité de tout le matelas alluvial, les résultats granulométriques correspondent à la granulométrie du lit. Dans ce cas, la granulométrie dans la trappe étant dépendante de la granulométrie du lit, des variations seront visibles s'il y'a plusieurs événements. La mobilité équivalente pourrait donc ne pas être visible. Or, si plusieurs couches et plusieurs événements sont regroupés, comme ici par classe de 10, la mobilité équivalente se dessinera plus facilement puisque la variabilité de la granulométrie du lit sera atténuée. C'est peut-être pourquoi une mobilité équivalente se dessine sur la figure avec des taux de transport regroupés par classe de 10 et non pas sur la figure où chaque taux de transport mesuré est représenté.

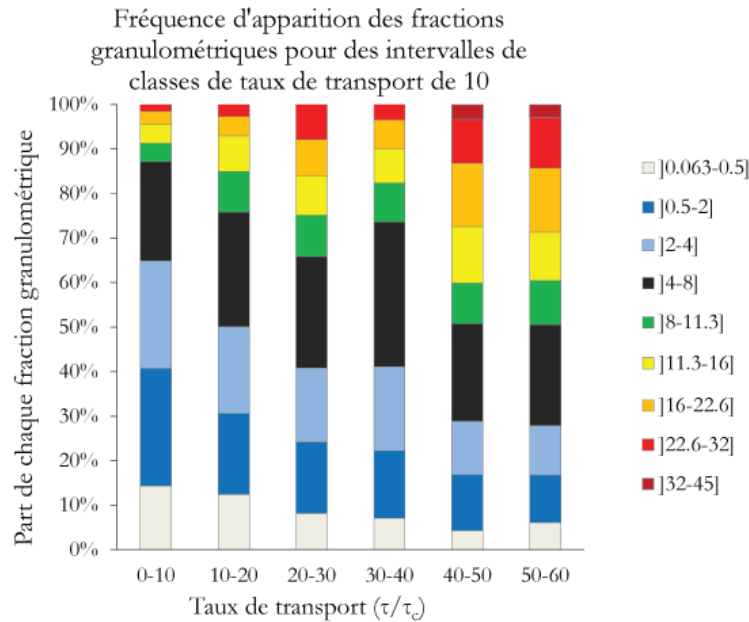


Figure 45: Représentation de la fréquence d'apparition des fractions granulométriques pour des classes de taux de transport de 10

## 2. CONSÉQUENCES DE L'OUVERTURE A 8CM ET DES AILETTES

La modification de la taille de l'ouverture a posé beaucoup de questions quant aux conséquences sur la granulométrie collectée par la trappe. En modifiant l'ouverture de 4 à 8cm, la distribution granulométrique devrait s'en trouver modifiée, devenant, à priori, plus grossière. Pourtant, les précédents graphiques ont bien montrés qu'il n'y avait pas de conséquences particulières. Or, en réalisant les graphiques du D50 et D90 (figure x et x) par rapport au taux de transport et en faisant la distinction entre les événements mesurés à 4 ou à 8cm, les résultats ne s'accordent pas avec ceux précédemment cités.

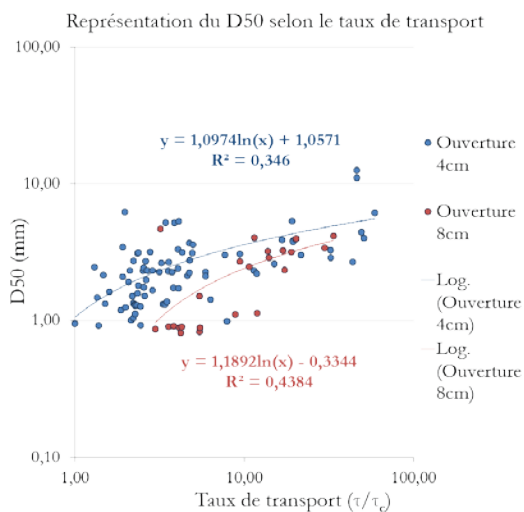


Figure 46: Représentation du D50 selon le taux de transport. Différenciation selon l'ouverture à 4 ou 8cm

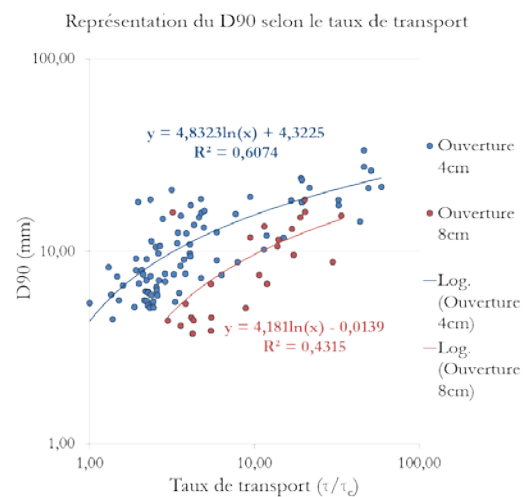
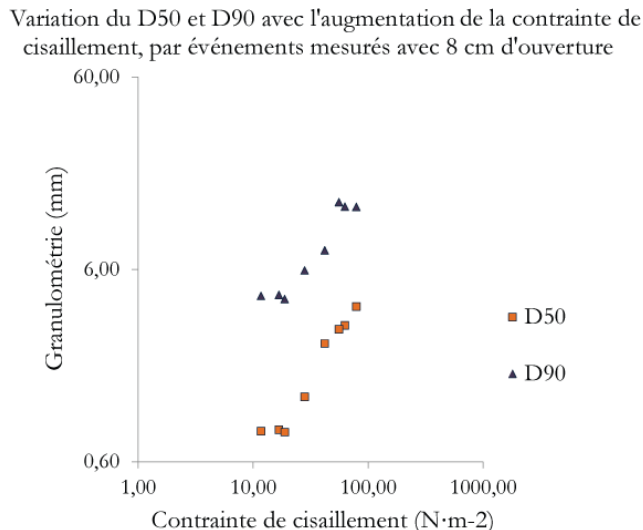


Figure 47: Représentation du D90 selon le taux de transport. Différenciation selon l'ouverture à 4 ou 8cm

Pour la figure 46 représentant le D50 en fonction du taux de transport, la différence entre les deux mesures n'est pas trop visible. Si dans les faibles écoulements, la valeur du D50 semble plus faible, dans les forts écoulements il ne semble pas y avoir de changements. Cependant, en ce qui concerne la figure 47, la courbe de tendance des événements mesurés avec 8cm d'ouverture est similaire mais avec un positionnement dans l'axe Y plus bas, ce qui veut dire que pour des taux de transport équivalents, la valeur du D90 est plus faible.

Parmi les explications possibles, il faut noter que la mesure sur 4cm se faisait, en réalité, sur 50cm. L'écoulement arrivant de biais, soit un angle d'environ  $45^\circ$ , les particules pouvaient rentrer sur la largeur mais aussi sur la longueur grâce à leur forme en plaquette. Cependant, nous pouvons constater qu'aucune particule de plus de 4,5cm n'a été tamisée. Lorsque des particules plus grosses que 4,5cm sont retrouvées dans la trappe leur quantité n'est pas supérieure à 5 et sont donc comptabilisées dans les « cinq particules les plus grosses ». Comment expliquer que la taille des 10% de particules les plus grosses soit plus faible alors que celles-ci sont plus petites que la largeur d'échantillonnage ? Cette question reste, pour le moment en suspens.

Pour terminer, il semblait important d'intégrer une figure comprenant que les événements mesurés à 8cm (Fig. 48) sur la base de la figure 35.



**Figure 48: Représentation de l'évolution du D50 et du D90 avec l'augmentation de la contrainte de cisaillement. Moyenne effectuée par événement mesurés à 8 cm d'ouverture**

Au contraire de la figure 35, la taille du D50 et du D90 est bien moins variable en fonction de l'augmentation de la contrainte de cisaillement. Plus celle-ci est importante, plus les grains charriés seront grossiers. Nous ne notons plus la forte variabilité dans les faibles taux de transport. Cette variabilité était explicable mais il sera intéressant de voir l'évolution de ce graphique afin de confirmer une variabilité naturelle et non une erreur de mesure.

## CONCLUSION

À l'échelle de l'événement du 26/08/2012, les relations entre des contraintes hydrauliques et le flux solide ou la granulométrie du charriage sont notables. Plus les contraintes hydrauliques sont importantes plus le flux solide sera important et plus la granulométrie sera grossière. Lorsque l'on étudie tous les événements, les précédentes relations sont aussi démontrées. Cependant, ces relations, en particulier concernant les contraintes hydrauliques et le flux solide, sont moins claires et moins visible que lors de l'événement du 26/08/2012, correspondant à un orage d'été, bref et intense.

Parmi l'ensemble de résultats, un des plus importants est la distinction entre les événements du printemps/été et ceux d'automne/hiver. Si, sur le terrain, la géomorphologie du chenal ne laissait aucun doute quant à des différences entre les saisons, les données collectées ont permis de mettre des relations sur ce phénomène saisonnier de respiration du lit.

Il est important de noter que tous les résultats obtenus le sont grâce à des instruments de mesure. Avec le développement des modélisations par ordinateur, la compréhension des phénomènes sur le terrain reste primordiale. Cependant, il pourrait être intéressant de faire quelques simulations à partir des données de terrain. Ces modélisations pourraient peut-être répondre à la question du seuil de mobilité équivalente.

Pour conclure, les événements compris dans les résultats de ce manuscrit représentent un panel largement représentatif puisque l'intensité des crues varie du plus faible enregistrable par les capteurs de pression à l'événement le plus fort depuis 30 ans de mesures de débits sur Draix. Les résultats actuels sont concluants et convaincants mais nécessitent encore un apport de nouvelles données et de nouveaux traitements statistiques pour une meilleure compréhension du charriage et de sa granulométrie dans le torrent du Moulin à Draix. Il apparaît clairement que l'utilisation d'une trappe à sédiment est un moyen fiable et aisé pour obtenir des données à propos du charriage et de sa granulométrie, du fait de sa mesure en continu et sans besoin de personnel le jour J. Cependant, la trappe à elle seule ne permet pas de comprendre totalement les complexités du transport par charriage, et les apports de l'étude par photographie, l'étude des chaînes d'érosion et de la rugosité du lit seront essentiels pour améliorer la compréhension des résultats.

## BIBLIOGRAPHIE

Allen, P., 1997. *Earth Surface Processes*, Blackwell Science, Oxford, 404 pp.

Bagnold, R., 1973. The nature of saltation and of 'bed load' transport in water. *Proc.R.Soc.Lond.*, 332: 473-504.

Borges, A.L., 1993. Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud. Thèse de doctorat de mécanique, Université Joseph Fourier Grenoble I, 205 pp.

Bravard, J.P. et Petit, F., 1997. *Les cours d'eau : dynamique du système fluvial*. Collection U, Armand Colin, Paris, 222 pp.

Brochot, S. et Meunier, M., 1993. Érosion en badlands dans les Alpes du Sud : synthèse. In : *Compte-rendu de recherches*, n° 3, BVRE de Draix. Cemagref éditions, 141-174.

Brochot, S., 1997. Les bassins versants de Draix, géologie. 2pp.

Bunte, K., Swingle, K. et Abt, S.R., 2007. Guidelines for using bedload traps in coarse-bedded mountain streams: Construction, installation, operation and sample processing. General Technical Report RMRS-GTR-191, Fort Collins, CO, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 91 pp.

Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Hsieh, M.-L. et Willett, S.D., 2003. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen, *Nature*, 426: 648-651.

Degoutte G., 2004. *Cours d'hydraulique, dynamique et morphologie fluviale*, Site Web AgroParisTech.

Du Boys, D. 1879. Le Rhône et les rivières à lit affouillable. *Annales des Ponts et Chaussées*, Série 5, Vol. 18, 1879, 141-195.

Favario, J., 2012. Analyse des premiers résultats concernant le charriage, obtenus grâce à une trappe à sédiments installée dans le bassin versant du Moulin à Draix, Mémoire de M2, IGA UJF. 96pp.

Ferguson, R. I., Prestegard, K. et Ashworth, P. J., 1989. Influence of sand on hydraulics and gravel transport in a braided, gravel-bed river, *Water Resour. Res.*, 25, 635-643.

Frey P., 2008. Transport solide par charriage à différentes échelles - Application aux cours d'eau de montagne, Mémoire présenté pour obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches, Cemagref, 96 pp.

Graf, W. et Altinakar, M., 1996. *Hydraulique Fluviale: Écoulement non permanent et phénomènes de transport*, Eyrolles, Paris.

Hassan, A. et Ergenzinger, P., 2003. Use of tracers in Fluvial Geomorphology. *Tools in fluvial geomorphology*. 397-423.

Helley E.J. et Smith W., 1971. Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler, open file report, Water Resour. Div., U. S. Geol. Surv. Menlo Park. Calif.

Houssais M., 2013. Etude expérimentale du transport en rivière par charriage d'un sédiment bimodal: vers un modèle général du transport à plusieurs tailles de grains. Doctorat de l'Université de Paris Diderot - Paris 7, Thèse, 177pp.

Klotz, S., Mathys, N., Olivier, J-E. et Whitead, P., 2005. Annuaire de l'ORE Draix, Cemagref.

Komar, P. D. et Shih, S.-M., 1992. Equal mobility versus changing bedload grain sizes in gravel-bed streams, in Dynamics of Gravel-Bed Rivers, 73-93pp.

Lenzi, M.A., D'Agostino, V. et Billi, P., 1999. Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon: Part I. Analysis of bedload records, conditions and threshold of bedload entrainment: Catena, v. 36, no. 3: 171-190.

Liébault, F., Peteuil C. et Remaître A., 2010. Approches géomorphologiques de la production sédimentaire des torrents. Sciences, Eaux et Territoires, N°02, 128-135.

Lucia, A., Recking, A., Martin-Duque, F. J., Storz-Peretz, Y. et Laronne J. B., 2013. Continuous monitoring of bedload discharge in a small, steep sandy channel, Journal of Hydrology 497, 37-50.

Mathys, N., 2006. Analyse et modélisation à différentes échelles des mécanismes d'érosion et de transport de matériaux solides ; Cas de petits bassins versants de montagne sur marne (Draix, Alpes-de-Haute-Provence). Thèse INP, Grenoble. 346pp.

Meunier, M., 1988. Les bassins versants expérimentaux de Draix. Etude et mesure de l'érosion. Plaquette de présentation des bassins de Draix.

Meunier, M., 1991. Éléments d'hydraulique torrentielle, Études Montagne, Éditions Cemagref, 278 pp.

Meunier, P., F. Metivier, E. Lajeunesse, A. S. Meriaux et J. Faure, 2006. Flow pattern and sediment transport in a braided river : The "torrent de st pierre" (french alps), Journal of Hydrology, 330 (3-4), 496-505.

Mühlhofer L., 1933. Schwebstoff- und Geschiebemessungen am Inn bei Kirchbichl (Tirol). Wasserkraft und Wasserwirtschaft 28Jg., S. 37-41.

Poreh, M., Sagiv, A. et Seginer, I., 1970. Sampling efficiency of slots. American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division 96: 2065-2078.

Powell, D. M., Reid, I. et Laronne, J. B., 1999. Hydraulic interpretation of cross-stream variation in bedload transport rate in two straight alluvial channels, J. Hydraul. Eng., 125, 1243-1252.

Powell, D. M., Reid, I. et Laronne, J. B., 2001. Evolution of bed load grain size distribution with increasing flow strength and the effect of flow duration on the caliber of bed load sediment yield in ephemeral gravel bed rivers, in Water Resources Research, VOL. 37, N° 5, 1463-1474.



Recking, A., Degoutte, G., Camenen, B., et Frey, P., 2013. Hydraulique et transport solide, in *Torrents et Rivières de Montagne: dynamique et aménagement*, edited by A. Recking, D. Richard, G. Degoutte, QUAE, 334pp.

Reid, I., Layman, J.T. et Frostick, L.E., 1980. The continuous measurement of bedload discharge. *Journal of Hydraulic Research* 18, 243-249.

Rey, F., Della Torre, S. et Berger, F. 2004. L'ingénierie écologique pour le contrôle de l'érosion dans les bassins versants torrentiels. *Sciences Eaux & Territoires : la Revue duIRSTEA*. Numéro spécial Ingénierie écologique, 17-24.

Robert, Y., 2000. Modélisation et techniques de mesures de l'érosion dans les bad-lands marneux des Alpes du sud. Approche expérimentale à l'échelle de la ravine dans les bassins de Draix, 04. Mémoire de DEA Thesis, IGA UJF, 176 pp.

Wilcock, P. R., 1992. Experimental investigation of the effect of mixture properties on transport dynamics, in *Dynamics of Gravel-Bed Rivers*, edited by P. Billi et al., John Wiley, New York, 109-130.

Wilcock, P. R. et McArdell, B. W., 1993. Surface-based fractional transport rates: Mobilization thresholds and partial transport of a sand-gravel sediment, *Water Resour. Res.*, 29, 1297-1312.

Wilcock, P., Pitlick, J., Cui, Y., 2009. *Sediment Transport Primer Estimating Bed-Material Transport in Gravel-bed Rivers*. 84pp.

# TABLE DES FIGURES

FIGURE 1: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES MODES DE TRANSPORT (DEGOUTTE, 2004) .....	8
FIGURE 2: DIAGRAMME CLASSIQUE DE HJULSTRÖM (DEGOUTTE, 2004).....	9
FIGURE 3: ÉCHANTILLONNEUR CLASSIQUE LARGE HELLEY-SMITH (WWW.FORESTY-SUPPLIERS.COM).....	11
FIGURE 4: SCHEMATISATION DE LA TRAPPE A FENTE DE DRAIX (LIEBAULT, 2011).....	13
FIGURE 5: SITUATION GEOGRAPHIQUE DU SITE D'ETUDE DE DRAIX ET DU MOULIN .....	18
FIGURE 6: "BADLANDS" DU MOULIN ET DU LAVAL, VU DEPUIS LE SOMMET DU CUCUYON.....	20
FIGURE 7: CARTE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES DU BASSIN VERSANT DU MOULIN (ULP) .....	21
FIGURE 8: STATION TYPE, D'APRES MURA,R. ET AL., 1988.....	21
FIGURE 9: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES SITUATIONS POSSIBLE LORS D'UN RELEVÉ DE CHAINES .....	22
FIGURE 10: ALTERITES DE MARNES SUR UN VERSANT.....	27
FIGURE 11: ACCUMULATION D'ALTERITES EN PIED DE VERSANT .....	27
FIGURE 12: GRAPHIQUE D'ÉVOLUTION DU STOCK DU CHENAL DEPUIS LES PREMIERS RELEVÉS (LIEBAULT, 2012)...	24
FIGURE 13: DERIVATION DE L'ÉCOULEMENT EN RIVE DROITE LORS D'UNE VIDANGE DE LA TRAPPE.....	27
FIGURE 14: PHOTOGRAPHIE DE LA TRAPPE APRES L'ÉVÉNEMENT DU 06 JUIN 2013.....	28
FIGURE 15: PHOTOGRAPHIE DE LA METHODE D'EXTRACTION PAR COUCHES DE 10 CM .....	28
FIGURE 16: CLASSES	
GRANULOMETRIQUES.....	31
FIGURE 17: GABARIT GRANULOMETRIQUE .....	31
FIGURE 18: AILETTES INSTALLEES SUR LA TRAPPE A FENTE .....	31
FIGURE 19: REPRESENTATION GRAPHIQUE DU REMPLISSAGE DE LA TRAPPE LORS DE LA PERIODE DU 22/09 AU 25/10/2012.....	31
FIGURE 20: REPRESENTATION GRAPHIQUE DU REMPLISSAGE DE LA TRAPPE LORS DE L'ÉVÉNEMENT DU 25 AOÛT 2012.....	36
FIGURE 21: REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA HAUTEUR D'EAU ET DU FLUX SOLIDE CHARRIÉ LORS DE L'ÉVÉNEMENT DU 25 AOÛT 2012 .....	37
FIGURE 22: REPRESENTATION GRAPHIQUE DU FLUX SOLIDE SELON LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT, ÉVÉNEMENT DU 25 AOÛT 2012.....	38
FIGURE 23: ÉVOLUTION DU D50 AVEC L'AUGMENTATION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT, ÉVÉNEMENT DU 25 AOÛT 2012 .....	39
FIGURE 24: ÉVOLUTION DU D90 AVEC L'AUGMENTATION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT, ÉVÉNEMENT DU 25 AOÛT 2012 .....	39
FIGURE 25: ÉVOLUTION DU FLUX SOLIDE CHARRIÉ EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT.....	40
FIGURE 26: ÉVOLUTION DU FLUX SOLIDE CHARRIÉ EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT. MISE EN FORME SAISONNIERE.....	41
FIGURE 27: ÉVOLUTION DU FLUX SOLIDE CHARRIÉ EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT. MISE EN FORME SELON LE BILAN SEDIMENTAIRE .....	42
FIGURE 28: ÉVOLUTION DU FLUX SOLIDE CHARRIÉ EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT. MISE EN FORME SELON L'OUVERTURE DE LA TRAPPE .....	43

FIGURE 29: ÉVOLUTION DU FLUX SOLIDE CHARRIE EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT. MISE EN FORME SELON L'OUVERTURE DE LA TRAPPE ET LA SAISON.....	43
FIGURE 30: REPRESENTATION DU D50 MOYEN DES EVENEMENTS POUR UN TAUX DE TRANSPORT DONNE. LES TAUX DE TRANSPORT ONT ETE ARRONDIS A L'ENTIER LE PLUS PROCHE.....	45
FIGURE 31: REPRESENTATION DU D90 MOYEN DES EVENEMENTS POUR UN TAUX DE TRANSPORT DONNE. LES TAUX DE TRANSPORT ONT ETE ARRONDIS A L'ENTIER LE PLUS PROCHE.....	45
FIGURE 32: REPRESENTATION DE LA TAILLE MOYENNE DES 5 PARTICULES LES PLUS GROSSES POUR UN TAUX DE TRANSPORT DONNE. LES TAUX DE TRANSPORT ONT ETE ARRONDIS A L'ENTIER LE PLUS PROCHE.....	46
FIGURE 33: REPRESENTATION DU D50 MOYEN DES EVENEMENTS, SELON LA SAISON, POUR UN TAUX DE TRANSPORT DONNE. LES TAUX DE TRANSPORT ONT ETE ARRONDIS A L'ENTIER LE PLUS PROCHE.....	47
FIGURE 34: REPRESENTATION DU D90 MOYEN DES EVENEMENTS, SELON LA SAISON, POUR UN TAUX DE TRANSPORT DONNE. LES TAUX DE TRANSPORT ONT ETE ARRONDIS A L'ENTIER LE PLUS PROCHE.....	47
FIGURE 35: ÉVOLUTION SAISONNIERE DU D50 ET DU D90 DE CHAQUE EVENEMENT EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT.....	48
FIGURE 36: PHOTOGRAPHIE DU CHENAL EN JUIN 2007 (LIEBAULT).....	53
FIGURE 37: PHOTOGRAPHIE DU CHENAL EN NOVEMBRE 2007 (LIEBAULT) .....	53
FIGURE 38: REPRESENTATION SAISONNIERE DU POURCENTAGE CUMULE DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES PAR EVENEMENT.....	50
FIGURE 39: REPRESENTATION SAISONNIERE DU POURCENTAGE CUMULE DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES PAR EVENEMENT. DISTINCTION SELON L'OUVERTURE A 4 OU 8 CM.....	50
FIGURE 40: REPRESENTATION DE LA FREQUENCE D'APPARITION DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES POUR CHAQUE TAUX DE TRANSPORT.....	51
FIGURE 41: REPRESENTATION DE LA FREQUENCE CUMULEE DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES <4 ET >8 MM POUR CHAQUE TAUX DE TRANSPORT .....	52
FIGURE 42: ÉVOLUTION DE LA DISTRIBUTION.....	56
FIGURE 43: REPRESENTATION DE LA FREQUENCE D'APPARITION .....	56
FIGURE 44: REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA BASE DE DONNEES SUR LES MESURES DU CHARRIAGE DANS LE MONDE ASSOCIEE AU NOMBRE DE SHIELDS .....	55
FIGURE 45: REPRESENTATION DE LA FREQUENCE D'APPARITION DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES POUR DES CLASSES DE TAUX DE TRANSPORT DE 10 .....	56
FIGURE 46: REPRESENTATION DU D50 SELON LE TAUX DE TRANSPORT. DIFFERENCIATION SELON L'OUVERTURE A 4 OU 8 CM.....	56
FIGURE 47: REPRESENTATION DU D90 SELON LE TAUX DE TRANSPORT. DIFFERENCIATION SELON L'OUVERTURE A 4 OU 8 CM.....	61
FIGURE 48: REPRESENTATION DE L'EVOLUTION DU D50 ET DU D90 AVEC L'AUGMENTATION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT. MOYENNE EFFECTUEE PAR EVENEMENT MESURES A 8 CM D'OUVERTURE.....	57

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>3</b>
<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>4</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>70</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>70</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>7</b>
1. CONTEXTE GENERAL.....	7
2. ÉTAT DE LA RECHERCHE.....	7
2.1. Généralités .....	8
2.1.1. Le transport par charriage .....	8
2.1.2. Mise en mouvement.....	9
2.1.3. Mobilité équivalente .....	10
2.2. Les techniques de mesure du charriage .....	10
2.2.1. Les techniques de mesure directes .....	10
2.2.2. Les techniques de mesures indirectes.....	11
2.3. La trappe à fente.....	12
2.3.1. Principes .....	12
2.3.2. Avantages .....	13
2.3.3. Inconvénients .....	14
2.4. Données collectées par une trappe à fente.....	14
3. OBJECTIFS ET ENJEUX.....	15
<b>PRESENTATION DU SITE .....</b>	<b>18</b>
1. SITE D'ETUDE : DRAIX.....	18
1.1. Situation géographique et contexte .....	18
1.2. Géologie et géomorphologie.....	19
2. MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU MOULIN .....	20
3. INSTRUMENTATION DU TORRENT DU MOULIN.....	21
4. COMPORTEMENT SAISONNIER DU CHENAL .....	23
<b>METHODOLOGIE .....</b>	<b>26</b>
1. DONNEES BRUTES .....	26
1.1. Données de la trappe.....	26
1.2. Données de hauteur d'eau .....	27
2. VIDANGE DE LA TRAPPE .....	27
3. TAMISAGE GRANULOMETRIQUE .....	29
3.1. Fractions granulométriques .....	29
3.2. Méthodologie de tamisage .....	30
4. TRAITEMENT DES DONNEES.....	30

4.1.	<i>Données de trappe</i> .....	30
4.1.1.	Recherche de l'événement.....	31
4.1.2.	Traitement de l'événement.....	32
4.2.	<i>Données granulométriques</i> .....	33
<b>RESULTATS</b> .....		<b>36</b>
1.	GRAPHIQUES PAR EVENEMENTS .....	36
1.1.	<i>Remplissage de la trappe</i> .....	36
1.2.	<i>Relation entre la hauteur d'eau et le flux charrié</i> .....	37
1.3.	<i>Relation entre la force tractrice et le flux charrié</i> .....	38
1.4.	<i>Évolution granulométrique</i> .....	38
2.	FLUX CHARRIE EN FONCTION DES CONTRAINTES HYDRAULIQUES .....	40
2.1.	<i>Flux solide selon la contrainte de cisaillement</i> .....	40
2.2.	<i>Comportement saisonnier et respiration du lit</i> .....	41
2.3.	<i>Comparaison selon la largeur d'échantillonnage</i> .....	42
3.	ÉVOLUTION GRANULOMETRIQUE EN FONCTION DE LA FORCE TRACTRICE .....	44
3.1.	<i>Évolution granulométrique selon le taux de transport</i> .....	44
3.2.	<i>Évolution du D50 et D90 selon la saison</i> .....	46
4.	ÉVOLUTION DES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES.....	49
4.1.	<i>Évolution des fractions granulométriques selon la saison</i> .....	49
4.2.	<i>Évolution des fractions granulométriques avec le taux de transport</i> .....	51
<b>DISCUSSION</b> .....		<b>54</b>
1.	COMPARAISON NAHAL ESHTEMOA .....	54
2.	CONSEQUENCES DE L'OUVERTURE A 8CM ET DES AILETTES .....	56
<b>CONCLUSION</b> .....		<b>58</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....		<b>59</b>
<b>TABLE DES FIGURES</b> .....		<b>62</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....		<b>64</b>
<b>ANNEXES</b> .....		<b>66</b>

# ANNEXES

## Annexe 1 : Feuille de synthèse. Remplie sur chaque événement.

1		TIME	REF		SLOPE m/m)	0,04
2	START BEDLOAD SAMPLING	25/08/2012 16:12:00	2869471		D50 (m)	0,00500
3	END BEDLOAD SAMPLING	25/08/2012 16:50:20	2869701		SSC (g/l)	175,0
4	DURATION (hh:mm:ss)	00:38:20			WATER DENSITY (kg/m3)	1175
5	TRAP FULL	YES			CRITICAL SHEAR STRESS (N/m2)	27,03
6					ADIM CRITICAL SHEAR STRESS	0,37
7					PERCENT >0.063	0,85
8	CONSTANT CALIBRATION 16/07/2012	398,41				
9	DELTA EMPTY (CM)	30,60				
10	SLOT WIDTH (M)	0,5				
11	SEDIMENT DENSITY (KG/M3)	2650				
12	ZERO DATUM (CM)	92,5				
13						
14	BEDLOAD YIELD (KG)	455			523,25	
15	MAX BEDLOAD RATE (KG/M/S)	1,5			1452,777778	
16	MEAN BEDLOAD RATE (KG/M/S)	0,3				
17						
18	BULK DENSITY (kg/m3)	1450				
19	VOLUME OF THE TRAP (m3)	0,34				
20	SURFACE OF THE TRAP (m2)	0,40				
21						
22	ACCURACY DRUCK SENSOR	0.04% FS				
23	FULL SCALE (mbar or cmH2O)	300				
24	random error of pressure (cm)	0,12				
25	95% CI uncertainty of delta pressure (cm)	0,33				
26	95% CI uncertainty of mass (kg)	1,33				
27	kg/m/s 10s	0,27				
28	kg/m/s 60s	0,04				
29						
30	width/depth ratio	5				
31						
32	Qmax (l/s)	353,8				
33	sediment concentration	0,18				
34	bed width (m)	1,40				
35	bank slope	0,89				

les forces tractrices ont été corrigées (facteur 0.7) pour tenir compte du ratio largeur/profondeur faible

attribution des couches granulo  
masse cumulée (avant suppression des fines): 523 kg  
hauteur de dépôt = 90cm

523/(0,9\*0,4)= 1452 kg/m3

## Annexe 2 : Extrait d'un traitement de données d'un événement. A : Temps ; B : Référence ; C : Pression au coussin ; D : Pression de l'eau ; E : Différentiel de pression ; F : Charriage (0= non et 1= oui) ; G : Masse cumulée immergée ; H : Masse cumulée emmergé ; J : Flux solide ; K : Hauteur d'eau au droit de la trappe ; L : Hauteur d'eau seuil trapézoïdal ; M : Débit seuil trapézoïdal ; N : Débit Parshall ; O : Contrainte de cisaillement.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	TIME	REF	PILLOW	WATER	DELTA	BEDLOAD	CUM BEDLOAD MASS SUBM	CUM BEDLOAD MASS	BEDLOAD FLUX	TRAP WATER DEPTH	WEIR WATER DEPTH	WEIR DISCHARGE	PARSHALL DISCHARGE	SHEAR STRESS	t-c	t*	t*/t*c	IB*	
2	dd/mm/yyyy hh:mm:ss		cm H2O	cm H2O	cm H2O		kg	kg	kg/m/s	m	mm	l/s	l/s	N/m2	N/m2	adim	adim	adim	
78	25/08/2012 16:09:00	2869453	68,00	40,20	27,90	0	11,95	18,25	0,00	0,000	16	17,83	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
79	25/08/2012 16:10:00	2869459	119,30	62,30	57,00	0	11,95	18,25	0,00	0,000	16	17,85	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
80	25/08/2012 16:11:00	2869465	143,70	104,70	39,00	0	11,95	18,25	0,00	0,051	61	64,82	1,36	22,12	0,00	0,31	0,82	0,00	
81	25/08/2012 16:12:00	2869471	159,40	113,70	45,70	1	60,16	91,87	1,36	0,193	231	353,84	9,57	73,02	45,99	1,01	2,70	0,41	
82	25/08/2012 16:13:00	2869477	166,90	113,90	53,00	1	89,24	136,29	1,48	0,213	211	312,00	51,49	79,23	52,20	1,10	2,93	0,45	
83	25/08/2012 16:14:00	2869483	170,50	110,90	59,60	1	115,54	176,44	1,34	0,195	198	286,63	76,59	73,45	46,42	1,02	2,72	0,41	
84	25/08/2012 16:15:00	2869489	175,10	109,60	65,50	1	139,05	212,34	1,20	0,179	174	242,46	80,22	68,37	41,34	0,95	2,53	0,36	
85	25/08/2012 16:16:00	2869495	178,70	108,60	70,10	1	157,37	240,33	0,93	0,162	143	186,63	76,33	62,79	35,76	0,87	2,32	0,28	
86	25/08/2012 16:17:00	2869501	181,80	107,60	74,20	1	173,71	265,27	0,83	0,151	132	168,86	74,78	59,32	32,29	0,82	2,19	0,25	
87	25/08/2012 16:18:00	2869507	185,30	107,50	77,80	1	188,05	287,17	0,73	0,152	117	143,72	74,99	59,49	32,46	0,82	2,20	0,22	
88	25/08/2012 16:19:00	2869513	188,30	106,90	81,40	1	202,39	309,08	0,73	0,148	119	146,72	77,44	58,25	31,22	0,81	2,15	0,22	
89	25/08/2012 16:20:00	2869519	189,20	104,80	84,40	1	214,34	327,33	0,61	0,134	115	140,90	79,14	53,20	26,17	0,74	1,97	0,19	
90	25/08/2012 16:21:00	2869525	190,10	104,20	85,90	1	220,32	336,46	0,30	0,120	90	103,15	76,04	48,43	21,40	0,67	1,79	0,09	
91	25/08/2012 16:22:00	2869531	189,90	102,60	87,30	1	225,90	344,97	0,28	0,108	75	83,48	72,28	43,92	16,89	0,61	1,62	0,09	
92	25/08/2012 16:23:00	2869537	190,40	102,10	88,30	1	229,88	351,06	0,20	0,100	70	76,32	68,58	41,29	14,26	0,57	1,53	0,06	
93	25/08/2012 16:24:00	2869543	190,20	101,20	89,00	1	232,67	355,32	0,14	0,090	58	61,59	66,22	37,37	10,34	0,52	1,38	0,04	
94	25/08/2012 16:25:00	2869549	190,80	100,90	89,90	1	236,26	360,79	0,18	0,086	43	43,76	60,40	35,91	8,88	0,50	1,33	0,06	
95	25/08/2012 16:26:00	2869555	191,00	100,40	90,60	1	239,05	365,05	0,14	0,082	29	29,70	55,71	34,19	7,16	0,47	1,27	0,04	
96	25/08/2012 16:27:00	2869561	191,30	100,10	91,20	1	241,44	368,70	0,12	0,077	24	25,19	52,95	32,40	5,37	0,45	1,20	0,04	
97	25/08/2012 16:28:00	2869567	191,50	99,90	91,60	1	243,03	371,14	0,08	0,076	20	21,20	48,53	31,94	4,91	0,44	1,18	0,02	
98	25/08/2012 16:29:00	2869573	191,70	99,70	92,00	1	244,62	373,57	0,08	0,073	24	25,29	42,65	30,97	3,94	0,43	1,15	0,02	
99	25/08/2012 16:30:00	2869579	191,60	99,30	92,30	0	244,62	373,57	0,00	0,070	23	24,07	36,73	29,67	2,64	0,41	1,10	0,00	
100	25/08/2012 16:31:00	2869585	191,60	98,90	92,70	1	247,41	377,83	0,08	0,066	21	22,47	32,21	28,02	0,99	0,39	1,04	0,02	
101	25/08/2012 16:32:00	2869591	191,40	98,60	92,80	0	247,41	377,83	0,00	0,062	20	20,90	28,28	26,70	0,00	0,37	0,99	0,00	
102	25/08/2012 16:33:00	2869597	191,30	98,30	93,00	0	247,41	377,83	0,00	0,059	18	19,37	24,38	25,50	0,00	0,35	0,94	0,00	
103	25/08/2012 16:34:00	2869603	191,20	98,00	93,20	0	247,41	377,83	0,00	0,056	16	17,88	21,58	24,09	0,00	0,33	0,89	0,00	
104	25/08/2012 16:35:00	2869609	191,10	97,70	93,40	0	247,41	377,83	0,00	0,054	15	16,78	19,47	23,21	0,00	0,32	0,86	0,00	
105	25/08/2012 16:36:00	2869615	191,10	97,50	93,60	0	247,41	377,83	0,00	0,051	13	15,70	16,84	22,05	0,00	0,30	0,82	0,00	
106	25/08/2012 16:37:00	2869621	191,00	97,20	93,70	0	247,41	377,83	0,00	0,049	13	14,65	14,96	21,00	0,00	0,29	0,78	0,00	

synthesisrawdataGraph1process

1MINrating curvehydrographcumbedloadgrain-sizebedloadD50layer

**Annexe 3 :** Feuille d'une couche granulométrique. La masse (en g) est notée manuellement après tamisage.

4	borne supérieure	Nombre ou Masse (g)	Fréquence	Fréquence cumulée
5	0,00035	0	0,00	0,00
6	0,06300	231	23,08	23,08
7	0,50000	92	9,20	32,27
8	2,00000	74	7,40	39,67
9	4,00000	110	11,00	50,67
10	8,00000	166	16,60	67,27
11	11,30000	86	8,58	75,84
12	16,00000	117	11,68	87,52
13	22,00000	68	6,83	94,35
14	32,00000	57	5,65	100,00
15			0,00	100,00
16			0,00	100,00
17			0,00	100,00
18			0,00	100,00
19			0,00	100,00
20			0,00	100,00
21			0,00	100,00
22			0,00	100,00
23			0,00	100,00
24			0,00	100,00
25			0,00	100,00
26			0,00	100,00
27			0,00	100,00
53	TOTAL	1000,20		

**Annexe 4 :** Première partie de la feuille de synthèse du fichier granulométrique.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	U	P
1	CUMULATIVE FREQU															
2	BSUP (MM)	LAYER_0-10	LAYER_10-20	LAYER_20-30	LAYER_30-40	LAYER_40-50	LAYER_50-60	LAYER_60-70	LAYER_70-80	LAYER_80-90	GLOBAL					
3	0,0010	0,00														
4	0,0025						0,00									
5	0,0025									0,00						
6	0,0025			0,00												
7	0,0025				0,00											
8	0,0041					0,00										
9	0,0060							0,00								
10	0,0061								0,00							
11	0,0090										0,00					
12	0,0450		0,00													
13	0,0630	20,08	23,08	19,48	16,36	15,87	17,22	14,40	23,72	16,64	18,61					
14	0,5000	40,66	32,27	32,09	27,17	27,25	31,80	32,46	43,00	32,99	33,64					
15	2,0000	50,88	39,67	40,08	34,98	37,43	43,39	46,64	57,34	48,20	44,60					
16	4,0000	63,51	50,67	50,98	44,02	50,60	61,17	62,73	69,54	61,53	57,49					
17	8,0000	77,76	67,27	64,32	58,68	69,06	79,68	83,68	88,86	80,71	74,61					
18	11,3000	84,16	75,84	72,52	67,00	77,64	89,06	92,63	93,07	88,49	82,36					
19	16,0000	91,86	87,52	80,95	77,27	87,03	97,13	97,85	99,09	96,40	90,63					
20	22,0000	97,24	94,35	87,94	86,90	94,41	100,00	100,00	100,00	100,00	95,73					
21	32,0000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					
22																
23	STATISTICS															
24	LAYER	D5	D10	D16	D25	D50	D75	D84	D90	D95	Sorting (INMAN 1952)	Sorting (FOLK-WARD 1957)	Skewness (INMAN 1952)	Skewness (FOLK-WARD 1957)	Kurtosis (INMAN 1952)	Kurtosis (FOLK-WARD 1957)
25	LAYER_0-10	0,014	0,023	0,042	0,103	1,776	6,995	11,204	14,709	19,265	4,033	3,600	-0,341	-0,341	0,295	0,704
26	LAYER_10-20	0,001	0,003	0,013	0,097	3,835	10,922	14,407	17,960	22,968	5,068	4,713	-0,623	-0,632	0,419	0,865
27	LAYER_20-30	0,006	0,013	0,036	0,156	3,753	12,517	18,388	23,456	27,397	4,507	4,101	-0,492	-0,511	0,353	0,790
28	LAYER_30-40	0,007	0,019	0,059	0,330	5,308	14,815	19,986	24,038	27,735	4,205	3,909	-0,545	-0,572	0,418	0,890
29	LAYER_40-50	0,009	0,022	0,065	0,332	3,876	10,159	14,302	18,387	23,443	3,896	3,674	-0,517	-0,530	0,462	0,946
30	LAYER_50-60	0,011	0,023	0,053	0,190	2,588	6,713	9,379	11,768	14,595	3,734	3,437	-0,503	-0,510	0,387	0,826
31	LAYER_60-70	0,021	0,038	0,076	0,213	2,312	6,003	8,099	10,210	13,234	3,371	3,090	-0,463	-0,460	0,375	0,788
32	LAYER_70-80	0,008	0,014	0,027	0,072	0,984	4,866	6,720	8,784	12,634	3,967	3,582	-0,301	-0,302	0,330	0,712
33	LAYER_80-90	0,014	0,027	0,058	0,182	2,196	6,509	9,258	12,075	15,046	3,658	3,349	-0,433	-0,440	0,371	0,796
34	GLOBAL	0,010	0,019	0,044	0,152	2,674	8,140	12,105	15,579	21,514	4,052	3,711	-0,462	-0,461	0,372	0,794



**Annexe 5 :** Deuxième partie de la feuille de synthèse du fichier granulométrique.

MASS in g									
LAYER	<0.063	]0.063-	]0.5-2]	]2-4]	]4-8]	]8-11.3]	]11.3-16]	]16-22.6]	largest
LAYER_0-10	289,00	296,20	147,00	181,90	205,00	92,10	110,90	77,40	39,70
LAYER_10-20	230,80	92,00	74,00	110,00	166,00	85,80	116,80	68,30	56,50
LAYER_20-30	195,40	126,50	80,10	109,30	133,80	82,30	84,50	70,10	121,00
LAYER_30-40	163,80	108,20	78,10	90,50	146,80	83,30	102,80	96,40	131,10
LAYER_40-50	159,00	114,00	102,00	132,00	185,00	86,00	94,00	74,00	56,00
LAYER_50-60	172,50	146,00	116,10	178,10	185,50	93,90	80,90	28,70	0,00
LAYER_60-70	144,70	181,50	142,50	161,70	210,60	89,90	52,50	21,60	0,00
LAYER_70-80	238,10	193,50	144,00	122,40	194,00	42,20	60,50	9,10	0,00
LAYER_80-90	167,20	164,20	152,80	133,90	192,70	78,20	79,40	36,20	0,00
GLOBAL	#####	1422,10	1036,60	1219,80	1619,40	733,70	782,30	481,80	404,30
									9460,50
FREQU									
LAYER	<0.063	]0.063-	]0.5-2]	]2-4]	]4-8]	]8-11.3]	]11.3-16]	]16-22.6]	
LAYER_0-10	20,08	20,58	10,21	12,64	14,24	6,40	7,71	5,38	2,76
LAYER_10-20	23,08	9,20	7,40	11,00	16,60	8,58	11,68	6,83	5,65
LAYER_20-30	19,48	12,61	7,99	10,90	13,34	8,21	8,42	6,99	12,06
LAYER_30-40	16,36	10,81	7,80	9,04	14,67	8,32	10,27	9,63	13,10
LAYER_40-50	15,87	11,38	10,18	13,17	18,46	8,58	9,38	7,39	5,53
LAYER_50-60	17,22	14,58	11,59	17,78	18,52	9,37	8,08	2,87	0,00
LAYER_60-70	14,40	18,06	14,18	16,09	20,96	8,95	5,22	2,15	0,00
LAYER_70-80	23,72	19,28	14,35	12,19	19,33	4,20	6,03	0,91	0,00
LAYER_80-90	16,64	16,34	15,21	13,33	19,18	7,78	7,90	3,60	0,00
GLOBAL	18,61	15,03	10,96	12,89	17,12	7,76	8,27	5,09	4,27
b-axis of the FIVE LARGEST CLASTS (mm)									
LAYER	CLAST	CLAST	CLAST3	CLAST4	CLAST5	MEAN	MAX		
LAYER_0-10	52,20	45,80	36,50	67,00	35,80	47,46	67,00		
LAYER_10-20	42,90	40,00	43,90	39,70	52,40	43,78	52,40		
LAYER_20-30	53,90	42,20	42,60	43,50	41,50	44,74	53,90		
LAYER_30-40	45,50	42,80	52,60	40,30	50,30	46,30	52,60		
LAYER_40-50	40,80	41,70	52,30	40,00	37,90	42,54	52,30		
LAYER_50-60	31,14	34,74	33,32	34,60	31,88	33,14	34,74		
LAYER_60-70	34,90	39,20	29,90	24,60	31,40	32,00	39,20		
LAYER_70-80	29,40	22,40	33,20	31,40	27,60	28,80	33,20		
LAYER_80-90	31,70	30,20	37,80	31,28	37,44	33,68	37,80		
GLOBAL						39,16	67,00		

**Annexe 6 :** Feuille granulométrique d'un événement. La granulométrie est répartie par couche.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	LAYER	DEPTH	CUM BEDLOAD	BEDLOAD FLUX	TRAP WATER DEPTH	VEIR DISCHARGE	PARSHALL DISCHARGE	SHEAR STRESS	t-to	t'	t'/t-to	IB*	D10	D16	D25	D50	D75	D84	D90	D95
2		m	kg	kg/m/s	m	l/s	l/s	N/m2	N/m2	adim	adim	adim	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
3	LAYER_0-10												0,02	0,04	0,10	1,78	7,00	11,20	14,71	19,27
4	LAYER_10-20	0,20	116	1,42	0,20	332,92	30,53	76,13	49,10	1,05	2,82	0,90	0,01	0,01	0,10	3,83	10,92	14,41	17,96	22,97
5	LAYER_20-30	0,30	174	1,42	0,20	332,92	30,53	76,13	49,10	1,05	2,82	0,90	0,01	0,04	0,16	3,76	12,52	18,39	23,46	27,40
6	LAYER_30-40	0,40	232	1,39	0,20	317,49	45,88	75,23	48,20	1,04	2,78	0,74	0,02	0,06	0,33	5,31	14,81	19,99	24,04	27,73
7	LAYER_40-50	0,50	290	1,06	0,17	214,55	78,27	65,58	38,55	0,91	2,43	0,32	0,02	0,06	0,33	3,88	10,16	14,30	18,39	23,44
8	LAYER_50-60	0,60	348	0,76	0,15	153,10	75,73	59,02	31,99	0,82	2,18	0,23	0,02	0,05	0,19	2,59	6,71	9,38	11,77	14,59
9	LAYER_60-70	0,70	406	0,31	0,11	93,09	72,45	44,84	17,81	0,62	1,68	0,09	0,04	0,08	0,21	2,31	6,00	8,10	10,21	13,23
10	LAYER_70-80	0,80	464	0,13	0,07	28,62	38,51	31,03	4,00	0,43	1,15	0,04	0,01	0,03	0,07	0,98	4,87	6,72	8,78	12,63
11	LAYER_80-90	0,90	521	0,37	0,12	159,72	30,04	46,50	19,47	0,64	1,72	0,11	0,03	0,06	0,18	2,20	6,51	9,26	12,07	15,05
12	GLOBAL												0,02	0,04	0,15	2,67	8,14	12,10	15,58	21,51
13	GLOBAL TRUNC 0.5												0,73	0,91	1,28	2,59	4,35	5,65	6,72	7,77



## **RESUME**

La détermination des conditions de mise en mouvement des matériaux lors du transport par charriage reste complexe à cause de la difficulté des mesures en conditions réelles. L'objectif de cette recherche est la compréhension des différences granulométriques du charriage pour des conditions hydrauliques similaires. L'installation de la trappe à sédiments dans le torrent du Moulin permet un suivi en temps réel du flux solide charrié et devrait permettre d'obtenir une meilleure compréhension des variations de la granulométrie du transport par charriage. En outre, le comportement saisonnier du chenal du Moulin sera particulièrement étudié afin d'apporter des réponses aux principales questions encadrant ce stage.

Mots clés: Charriage, granulométrie, marnes noires, trappe à sédiments Birkbeck, torrents, Draix.

## **ABSTRACT**

Determining conditions of threshold of bed load motion is complex due to real environment difficulties. The aim of this research is the understanding of bed load grain size distributions with the increase of flow strength. The bed load continuous monitoring with the Birkbeck bedload sampler in the stream of the « Moulin » allow a better comprehension of bed load grain size distributions. The Moulin's stream seasonal behavior is study to answer, partly, at the main problems of this research.

Keywords: Bed load, size distribution, blacks marls, Birkbeck sampler, stream, Draix.